


FONDO PIZZOFALCONE


Google

LA THERMOCHRÔSE

OU

LA COLORATION CALORIFIQUE



LA THERMOCHRÔSE

OU LA

COLORATION CALORIFIQUE

DÉMONTRÉE PAR UN GRAND NOMBRE D'EXPÉRIENCES, ET CONSIDÉRÉE SOUS SES DIVERS RAPPORTS AVEC LA SCIENCE DE LA CHALEUR RAYONNANTE.

PAR

MACÈDOINE MELLONI

De la Société Italienne des Sciences et de l'Académie de Naples et de Turin; l'un des trente associés étrangers de l'Ordre pour le mérite (sciences et arts) de Prusse; membre des Sociétés royales de Londres et d'Édimbourg, et de l'Académie royale de Suède; correspondant de l'Institut de France et des Académies de Berlin, de Genève, de Saint-Pétersbourg, etc.

Ouvrage complémentaire de tous les traités de physique

> La metafisica delle geometrie sta negli assiomi e ne' postulati, e quella delle fisiche nelle osservazioni e nelle esperienze.
>
> GALILEO GALILEI.

PREMIÈRE PARTIE

—

NAPLES

IMPRIMERIE DE JOSEPH BARON

1850

Dédié Par l'Auteur

A MESSIEURS FRANÇOIS ARAGO ET ALEXANDRE HUMBOLDT

En les remerciant d'avoir consenti à accepter ce faible gage des sentiments d'estime, d'amitié et de reconnaissance, que la supériorité de leurs talents et l'élévation de leur caractère ont profondément gravés dans son cœur !

INTRODUCTION

Quelle que soit l'influence exercée par les vicissitudes de la vie sur nos goûts et sur nos habitudes, on ne saurait nier que nous naissons presque tous avec des tendances dominantes qui nous entraînent sans cesse dans une sphère particulière d'idées favorites. A ces idées nous sacrifions bien souvent nos intérêts matériels; et si nous sommes forcés d'y renoncer passagèrement, notre esprit revient à elles avec ardeur, aussitôt que les circonstances impérieuses qui nous en avaient écartés ont cessé d'exister.

Le spectacle de la nature fut pour moi, comme pour tant d'autres, la source des plus vives émotions de l'enfance. J'aimais les prairies, les forêts, les plaines, les montagnes; j'admirais la richesse de la

végétation dont elles sont parées, et la multitude d'êtres animés qui les habitent. Mais rien ne frappait autant mon imagination que le lien si intime qui réunit les phénomènes de la vie à l'astre brillant du jour.

Né et élevé à Parme, j'allais pendant la belle saison passer mes jours de congé dans une gracieuse et fraîche campagne, habitée par une partie de ma famille, à une petite distance de la ville; et pour ne pas perdre un seul instant de ces bienheureuses journées, j'étais déja rendu sur les lieux la veille au soir. Je me couchais de fort bonne heure, et me levais avec l'aube. Alors je me glissais doucement hors de la maison paternelle, et, muni d'un livre, je courais à l'air libre, le cœur bondissant de joie. Puis, je suivais un sentier qui serpentait d'abord dans l'intérieur d'une belle prairie, qui côtoyait ensuite un bassin et le ruisseau chargé d'y porter, en murmurant, le tribut de ses eaux limpides. Je montais enfin sur un petit tertre que couronnait un superbe groupe d'ormeaux séculaires. Arrivé au sommet, je me plaçais du côté de l'Orient, le dos appuyé contre le tronc gigantesque de l'un des ormeaux, et je commençais ma lecture à la lueur du crépuscule. L'agréable fraîcheur des champs, qui succédait à la chaleur étouffante de ma chambrette et le profond silence qui régnait tout autour de moi imprimaient une nouvelle vigueur à mon esprit, et concentraient mes idées sur le sujet traité dans le li-

vre dont j'étais porteur: je lisais avec la plus grande attention.

Mais, à mesure que le ciel se colorait des belles teintes de l'aurore, les distractions commençaient, et ne cessaient d'augmenter avec le gazouillement des oiseaux, réunis en bandes joyeuses sur les branches des vieux ormes, avec le bourdonnement des abeilles sortant en foule des ruches voisines, avec l'aboiement des chiens du berger, les cris aigus des paons, le hennissement des chevaux, le mugissement des bœufs et la voix des hommes qui les conduisaient au pâturage ou au travail des champs. Enfin le soleil paraissait tout radieux sur l'horizon, le livre était abandonné . . . Et mon esprit se laissait complétement absorber par cet admirable éveil de la nature!

L'action de la lumière sur les êtres animés était évidente: mais comment s'exerçait-elle?

Et, d'abord, qu'est-ce que la lumière et comment parvient-elle sur la terre?

J'ignorais alors et les lois de la gravitation et l'immensité de l'espace qui nous sépare du soleil. Des discours assez vagues m'avaient à peine laissé entrevoir la puissante attraction de cet astre pour le globe terrestre; cependant je comprenais parfaitement la grande différence entre une cause dont l'action est incessante et un agent arrivant avec le soleil et disparaissant avec lui. L'idée du rayonnement lumineux était d'ailleurs familière à mon esprit, et l'ob-

servation journalière m'avait appris que la lumière, arrêtée par les corps opaques, marche en ligne droite dans l'air, sans fléchir ni se laisser détourner de son chemin par l'agitation de ce fluide.

Mais les rayons solaires ne sont pas seulement lumineux ; ils possèdent aussi la propriété échauffante, et cette propriété me semblait exercer sur la nature une action bien plus puissante que la lumière. Je voyais, en effet, se produire pendant le cours d'une année des phases de mouvement et de torpeur beaucoup plus essentielles aux phénomènes de la vie organique que celles du jour et de la nuit; je voyais les bourgeons s'ouvrir par la tiédeur du printemps et les feuilles tomber lorsque survenait le froid de l'automne ; la campagne fourmiller d'insectes et d'oiseaux pendant les ardeurs de l'été et presque totalement déserte sous les frimas de l'hiver. Je comprenais parfaitement que ces alternatives de chaleur et de froid étaient causées par la durée plus ou moins prolongée du jour et par les diverses hauteurs que le soleil atteignait à l'instant du midi. Ainsi, point de doute, les rayons solaires apportaient sur la terre l'élément calorifique qui était beaucoup plus nécessaire que la lumière au développement de la vie. La chimie vint m'apprendre plus tard que j'étais dans l'erreur; car, sans la présence de la lumière, les plantes ne pourraient pas décomposer l'acide carbonique répandu dans l'atmosphère et s'emparer du car-

boue qui forme la base fondamentale de leur accroissement progressif; en sorte que si la lumière venait à s'éteindre, lors même que les températures propres du sol et de l'atmosphère ne subiraient aucune altération, les végétaux disparaîtraient bientôt de la surface terrestre, et avec eux l'homme, ainsi que tous les êtres animés.

Mais il n'en est pas moins vrai que cette grande catastrophe se produirait tout de même si le rayonnement solaire pouvait conserver la propriété lumineuse en perdant la propriété calorifique. Cette pensée fit une impression profonde sur mon esprit.

Dès lors, l'étude de la chaleur rayonnante acquit à mes yeux un charme indicible. L'aspect d'une cheminée dans laquelle pétillait du bois enflammé, celui d'un fourneau plein de charbons incandescents ou d'un simple poêle échauffé, attiraient toujours avec force mon attention vers eux. Ce n'était pas ce qui se passait dans l'intérieur de ces appareils qui absorbait les méditations de ma jeune intelligence, mais c'était principalement les effluences extérieures auxquelles je devais la sensation de chaleur éprouvée à distance. Je concevais parfaitement la grande analogie entre de telles effluences et la chaleur solaire; je les sentais toutes arrêtées derrière un corps opaque et j'en déduisais leur marche rectiligne, indépendante des fluctuations de l'air, jusque dans le cas où elles étaient complétement obscures; d'où je

concluais que ces effluences avaient une forme rayonnante comme la lumière. Mais j'étais intimement convaincu qu'il devait y avoir entre elles des différences importantes, et je cherchais vainement en quoi ces différences pouvaient consister.

Enfin la marche des études me conduisant à la science qui traite des propriétés des corps et des forces de la nature, je tâchais de parcourir de mon mieux cette science intéressante dans toute son étendue; et, pendant le cours de mes travaux, je ne manquais pas, comme on peut le penser aisément, de saisir avec avidité tout ce qui avait rapport aux radiations calorifiques. Je vis d'autres agens impondérables, tels que le magnétisme et l'électricité, rayonner comme la chaleur du soleil et des sources terrestres, et décroître comme elle d'après la loi du carré des distances. J'admirais la richesse et la magnificence de l'optique, je comparais cette science au petit nombre de propositions qui formaient le traité de la chaleur rayonnante, et je m'affligeais en voyant que je ne pouvais trouver les données propres à satisfaire ma curiosité.

Chargé moi-même d'enseigner la physique à peine sorti des bancs de l'école, je ne cessai de noter, pendant les sept années consécutives que durèrent ces cours professés à l'Université de Parme (de 1824 à 1831), les faits relatifs à mes idées dominantes. J'en tirai plusieurs conjectures; je tâchai même de les soumettre à l'épreuve de l'expérience, mais je fus toujours

arrêté par le manque d'appareils et d'instruments convenables ou par leurs imperfections.

Dans ce temps-là Nobili habitait Reggio, sa ville natale, située à peu de distance de Parme. Cet illustre savant m'honorait de son amitié et ne manquait jamais de m'écrire toutes les fois qu'il parvenait à quelque résultat intéressant. Un jour je reçois une de ses lettres contenant la description d'un appareil nouveau pour reconnaître les petites différences de température entre les corps.

Ce fut pour moi un trait de lumière.

Le thermoscope imaginé par Nobili avait de grands avantages sur les instruments employés jusqu'alors pour la mesure de la chaleur, mais il exigeait le contact du corps chaud et marchait avec les changements de température du milieu dans lequel il était plongé. Pour le rendre propre au but que je me proposais, il fallait qu'il ressentît à distance la chaleur des plus faibles sources, et qu'il fût tout-à-fait insensible aux variations de température de l'air atmosphérique. Je cherchai donc à lui communiquer ces précieuses qualités, et je réussis au-delà de mes espérances.

L'esprit de Nobili était trop élevé pour tâcher de dissimuler ou d'amoindrir l'importance des résultats obtenus par son jeune ami. Après avoir examiné l'instrument, il rédigea une note dans laquelle il fit ressortir avec complaisance les avantages qui résultaient de la nouvelle disposition des choses que j'avais

adoptée, et il la transmit à la Bibliotèque Universelle de Genève où elle fut imprimée.

Encouragé par les éloges d'un tel homme et muni de moyens parfaitement adaptés au but que jusqu'alors j'avais en vain tâché d'atteindre, je repris avec une nouvelle ardeur mes études sur la chaleur rayonnante.

Mais les événements politiques qui éclatèrent dans les Légations et dans les Duchés de Parme et de Modène, au commencement de l'année 1831, vinrent bouleverser tous mes plans. Je quittai ma ville natale, je parcourus successivement différentes parties de la Péninsule et je fus enfin obligé de me réfugier en France.

Pendant cette époque, si pleine de fortes et continuelles émotions, je n'oubliai pourtant pas mes rayons calorifiques; j'y revenais au contraire avec délices à chaque instant de loisir, j'y pensais en voyageant, j'y pensais durant la journée et même pendant de longues heures d'insomnie.

Mon appareil thermoscopique était du petit nombre des objets que j'emportais avec moi ; j'en prenais autant de soin que le spéculateur du faible capital sur lequel repose l'espoir de sa fortune. Arrivé à Paris plein de mon sujet, je mis de suite la main à l'œuvre.

Cependant, comme les expériences exigeaient de la dépense , mes moyens pécuniaires, assez faibles d'ailleurs, furent bientôt complétement épuisés. Il fallut accepter, hors de Paris, une chaire de physique que

m'offrirent des amis tout puissants près du gouvernement d'alors; je partis pour Dôle, dans le département du Jura, où je devais professer. J'y trouvai d'excellents confrères, une société estimable, instruite; et pourtant ce nouveau séjour me devint bientôt insupportable; car si les ressources scientifiques de Paris sont immenses, les villes de province possèdent à peine le strict nécessaire pour une instruction plus ou moins étendue, mais toujours élémentaire. En vain y chercherait-on les moyens indispensables pour reculer les limites des sciences (*)..... et la raison d'un

(*) Pour justifier cette proposition, qui pourrait paraître hasardée dans la bouche d'un étranger, il suffira de citer le passage suivant d'un discours prononcé par M. F. Arago à la Chambre des députés sous le règne de Louis-Philippe, quelques mois après ma rentrée en Italie :

« Remarquez-le bien, Messieurs, quand on éloigne un homme d'étude d'un foyer dans lequel il peut trouver les moyens de perfectionner ses travaux, on le tue moralement, on le tue dans ce qu'il y a de plus noble, de plus élevé chez l'homme, dans l'intelligence. »

« Naguère il y avait à Paris des réfugiés italiens qui, de peur que le ministère n'usât à leur égard du pouvoir exorbitant que vous lui avez donné d'expulser à sa guise, comme il l'entend, quand il le veut, sans explications, préférèrent s'imposer les plus rudes privations et renoncer aux subsides. Vous comprenez que je suis loin de les en blâmer. L'un de ces jeunes Italiens, quand il arriva à Paris, était déjà un professeur distingué, mais il n'était encore que cela. Dans Paris il a trouvé ce qu'il n'aurait rencontré nulle part ailleurs: des bibliothèques, des artistes qui pouvaient exécuter les instruments qu'il ima-

tel état de choses n'est peut-être pas bien difficile à saisir.

Quoi qu'il en soit de la cause, l'effet blessait si vivement mes projets d'avenir scientifique que je résolus de sortir à tout prix de ce mauvais pas : je commençai donc à vivre avec la plus stricte économie; et lorsque j'eus amassé quelques épargnes, je me hâtai d'envoyer ma démission à Paris. Je quittai Dôle, et je passai à Genève, où je fus parfaitement reçu par M. Auguste de la Rive et par le respectable Pierre Prévost qui conservait encore, à cette époque très-avancée de son existence, les belles qualités de tête et de cœur, dont la nature l'avait si largement doué.

Je restai à Genève environ six mois, pendant lesquels je préparai, au moyen des ressources des collections académiques que l'amitié de M. de la Rive avait mises à ma disposition, les matériaux de mon premier mémoire sur la transmission de la chaleur rayonnante à travers différentes substances solides et liquides. Je me dirigeai alors de nouveau sur Paris, afin de communiquer moi-même ce travail à l'Institut et de refaire les expériences sous les yeux d'une com-

ginait, des savants dont les entretiens, dont les communications ont pu l'aider et l'exciter... *Ce jeune homme, si vous l'aviez confiné dans une ville de province, n'y aurait trouvé aucun aliment pour son génie; la science ne se serait pas enrichie d'une foule de brillantes découvertes....* » (*Moniteur univ.* 15 *janv.* 1838 — *pag.* 1682.)

mission capable de leur donner le degré de publicité et d'authenticité nécessaire pour les introduire définitivement dans la science.

Mais de nouveaux obstacles vinrent me barrer le chemin, aussitôt que j'eus mis le pied dans la capitale de la France. Soit que mes propositions ne fussent pas assez clairement énoncées, soit que la moisson que j'avais recueillie déplût aux amis de ceux qui avaient exploité avec beaucoup plus de science, mais avec moins de succès et de profit, le même terrain que moi, mon devoir d'historien m'oblige à confesser que deux des trois commissaires nommés par l'Académie pour examiner mes travaux me firent un accueil glacial. On trouva les faits vagues, les idées trop hardies, les conséquences contradictoires. On l'annonça même dans un cours à la Sorbonne. Un ami tout consterné vint me l'apprendre. Il fut bien étonné en me voyant accueillir cette nouvelle par un sourire.— « La chose était sérieuse, disait-il, beaucoup plus sérieuse que je ne le pensais, car le professeur qui avait prononcé ces mots en public était un homme supérieur, profondément instruit, considéré à juste titre comme l'un des premiers physiciens de l'époque. » — « Voilà précisément pourquoi je suis si peu affecté, lui répondis-je; si votre professeur avait bien voulu prendre la peine d'assister à mes expériences, au lieu de les nier, s'il avait eu la patience d'écouter mes explications avant de les contredire, il ne

se serait certainement pas exposé à devoir rétracter plus tard ce qu'il vient de débiter publiquement aujourd'hui; car les résultats que j'ai annoncés sont évidens, faciles à reproduire, un vrai savant ne saurait résister à la force des démonstrations. Et si, guidé par des principes hypothétiques, il a eu le tort de se prononcer contre les propositions et les expériences qui en démontraient la vérité, même avant de les connaître, il devra nécessairement avouer son erreur, dès qu'il en aura acquis une idée exacte ».

Ma prédiction s'accomplit : l'année suivante le savant professeur dut faire amende honorable devant ses élèves.

Mais le parti contraire dominant toujours à l'INSTITUT (*), et les nouveaux mémoires que je présen-

(*) La fin de la période explique le sens dans lequel on doit entendre cette proposition, et en exclut toute interprétation malveillante à l'égard d'une corporation scientifique qui, par la rectitude de ses jugements, a presque toujours récompensé le vrai mérite et dégagé plus d'une fois le vaste champ de la science des rêves de l'imagination et des impostures du charlatanisme. Ce n'est pas la majorité des membres constituant alors l'Académie des sciences, mais celle de la commission spéciale chargée d'examiner mes travaux que j'ai voulu désigner par les mots *parti contraire*, c'est-à dire, deux membres seulement sur soixante-trois qui composent cette Académie-Modèle. Ces deux membres jouissaient d'un grand crédit parmi leurs collègues; voilà pourquoi on s'en rapporta entièrement à leur opinion tant que mes expériences furent obscures et ignorées; j'ajouterai, du reste, que ni l'un ni l'autre n'existent aujourd'hui et que c'é-

tais à cet illustre corps savant étant sans cesse renvoyés à la même commission, je n'obtenais jamais les honneurs d'un rapport. Cela contrariait directement le but que je m'étais proposé en me rendant à Paris. Je comprenais parfaitement que les résultats si étranges et si inattendus, déduits de mes expériences sur la transmission calorifique, seraient difficilement adoptés sans une discussion approfondie et sans le témoignage d'une réunion imposante de savants du premier ordre.

Cependant ce silence de mauvais augure, que la commission s'obstinait à garder sur mes travaux scientifiques ne me découragea point. Comme j'étais intimément convaincu de l'importance des données que j'apportais à la science, ma foi dans l'avenir ne pouvait s'éteindre, ni par une guerre ouverte, ni sous l'action encore plus écrasante de l'indifférence.

Je me décidai à publier une série de mémoires qu'on semblait vouloir condamner à l'obscurité; et

taient des hommes très-remarquables, non seulement par les découvertes dont ils ont enrichi la science, mais aussi par la loyauté de leur caractère. L'affection qu'ils portaient à d'autres personnes et à d'autres idées fut peut-être la cause unique du peu de bienveillance qu'ils montrèrent à mon égard. Et d'ailleurs il me semble qu'il faut accepter comme une vérité irrécusable, à laquelle les académiciens eux-mêmes ne sauraient échapper, *qu'en ce bas monde personne n'est exempt de faiblesse!*

ce fut une heureuse inspiration pour mes expériences, car ma bonne étoile leur procura ainsi une petite place dans le rayonnement du monde savant ! La Société Royale de Londres fit examiner les écrits que je venais de livrer à l'impression et, sur l'avis d'un de ses membres les plus illustres, l'honorable M. Faraday, elle les jugea dignes de la grande médaille de Rumford, qu'elle avait donnée quelques années auparavant à Malus et à Fresnel.

Ce fut un coup de foudre pour mes détracteurs!

Le système qui jusqu'alors avait prévalu ne pouvait plus se soutenir. En effet, à l'occasion du premier mémoire que je communiquai à l'Académie, on nomma une nouvelle commission chargée de prendre en considération l'ensemble de mes expériences. J'entrai aussitôt en relation avec les nouveaux commissaires, et après plusieurs mois d'un examen consciencieux, qui exigea de leur part, et *peut-être aussi de la mienne*, une constance à toute épreuve, j'obtins enfin ce rapport si longtemps désiré, dont les conclusions, on ne peut plus favorables, furent une des plus douces récompenses de mes travaux scientifiques (*).

(*) Mon premier mémoire sur la chaleur rayonnante fut présenté à l'Institut de France le 4 février 1833. La Société Royale de Londres me décerna sa médaille au commencement de janvier 1835; et six mois plus tard, en juin 1835, M. Biot, rapporteur de la nouvelle commission qu'on m'avait désignée, faisait son rapport à l'Académie.

En traçant cette esquisse historique j'ai voulu montrer d'abord qu'un jeune homme porté par un penchant décidé vers l'étude de la nature est presque sûr de parvenir à quelque donnée nouvelle, si après avoir bien médité sur les principes connus, il sait diriger avec persévérance ses efforts sur le sujet de recherche qui a le plus frappé son imagination. Je me suis ensuite proposé de faire voir que le manque de moyens, l'exil, les contrariétés, les obstacles de toute espèce ne peuvent pas détourner de son but une volonté ferme et résolue. Enfin j'ai tâché d'indiquer la meilleure route à suivre pour rendre utile à la science un nouveau résultat que l'on vient d'obtenir.

Découvrir une vérité et la communiquer au public n'est que la moitié de l'ouvrage. Pour la rendre féconde il faut qu'elle soit adoptée par les générations présentes et futures qui doivent en tirer, tôt ou tard, tout le parti dont elle est susceptible. Et pour cela il ne suffit pas de l'imprimer. En effet, on a mille exemples d'observations ingénieuses, qui contenaient les germes des plus importantes découvertes et qui ont été pourtant oubliées pendant des siècles dans la poussière des bibliothèques. Il faut encore savoir présenter l'idée sous son véritable point de vue, en varier la forme, s'il est possible, de plusieurs manières, la reprendre à propos, la répéter souvent, jusqu'à ce que les auteurs des traités

destinés à l'instruction publique l'aient insérée dans leurs ouvrages, puisque c'est là que se trouvent inscrits les résultats généralement admis, et pouvant servir comme point de départ aux découvertes ultérieures.

L'autorité, si justement respectée, des commissaires de l'INSTITUT de France abrégea à mon égard le temps et les peines nécessaires pour atteindre ce but; et, quelques mois après la publication de leur rapport, la description d'une grande partie des propriétés que j'avais eu le bonheur d'observer le premier dans les rayons calorifiques fut ajoutée aux éditions nouvelles de presque tous les traités de physique publiés en Europe.

Cependant les auteurs se bornèrent à rapporter les faits purs et simples sans en considérer les rapports de relation, et ils négligèrent ainsi plusieurs conséquences très-importantes, qui selon moi résultent avec la plus grande évidence de mes expériences, notamment: les données relatives à la nature de la force absorbante des corps, les conclusions sur l'hétérogénéité des éléments contenus dans les radiations des sources calorifiques terrestres, et les arguments qui s'en déduisent sur l'identité de la lumière et de la chaleur.

Cette négligence me parut trop contraire aux intérêts de la science pour que je ne dusse pas en rechercher la cause.

Il était difficile de l'attribuer à un parti pris entre les membres d'une classe de savants qui ne recule jamais devant les progrès bien constatés des connaissances humaines ; elle provenait donc de quelque erreur de fond ou de forme dans l'expression des résultats que j'avais publiés.

Un examen consciencieux rendit de plus en plus évidente la vérité de cette conclusion. Considérées dans leur ensemble, les notions sur les propriétés des flux calorifiques et sur la doctrine de l'identité, qui résultent de mes écrits, étaient incomplètes; certaines démonstrations manquaient, d'autres n'étaient pas irréprochables, ou ne se succédaient point dans l'ordre naturel.

Ces défauts trouvent sans doute quelque excuse dans le mode de publication adopté; car si un auteur de mémoires réunit à son sujet toutes les matières qui s'y rapportent, il tâche aussi d'en écarter avec le plus grand soin toutes celles qui lui sont étrangères; de sorte que lorsqu'on s'apprête à recueillir en un seul corps de doctrine les faits et les idées répandus çà et là dans ce genre d'ouvrages, on y rencontre nécessairement de nombreuses lacunes.

Et peut-être dois-je avouer que rien ne pouvait justifier le vice de forme dont quelques-uns de mes mémoires sont entachés !

En effet, tous les arguments que je citais à l'appui de l'identité du genre auquel appartiennent les di-

verses espèces de rayons lumineux ou obscurs sont, comme on le verra, complétement indépendants de l'essence du principe qui constitue le phénomène du rayonnement; et j'eus le tort, je le confesse, d'en exposer plusieurs avec le langage de la théorie des ondulations. Il s'ensuivit que ces propositions prirent une apparence d'hypothèse, qui contribua sans doute au peu de faveur qu'elles rencontrèrent auprès des esprits positifs.

Pour éclairer l'opinion sur ce qu'il pouvait y avoir de vrai dans mes idées scientifiques, il fallait donc reproduire et compléter les arguments et les recherches, et disposer ensuite le tout avec ordre et méthode, en évitant soigneusement toute expression relative aux différents systèmes que l'on a imaginés pour expliquer la lumière et la chaleur rayonnante.

Voilà précisément le but de l'ouvrage que j'ai l'honneur de présenter en ce moment au public.

Le titre en indique le résultat fondamental et donne, pour ainsi dire, sa *formule générale*. Nous verrons en effet, que les diverses espèces de rayons calorifiques se distinguent entre elles par des propriétés particulières, insensibles à l'organe de la vue, mais totalement semblables aux couleurs. Or, le terme COLORATION CALORIFIQUE, OU THERMOCHRÔSE rappelle en même temps la chaleur dans un état analogue à la lumière, et la multiplicité des espèces dont elle se compose.

A cela il faut ajouter que ces espèces élémentaires ne sont jamais toutes coexistantes dans le même rayonnement, ce qui exclut la possibilité de la *chaleur blanche* et rend d'autant plus juste la dénomination de THERMOCHRÔSE, appliquée à l'étude des *chaleurs colorées* provenant des différentes sources calorifiques.

Je passerai sous silence les nombreuses variantes et additions que le texte contient relativement à mes travaux antérieurs ; elles seront relevées en temps et lieu, toutes les fois que la chose en vaudra la peine. Mais je crois nécessaire de dire quelques mots sur les moyens de mesure employés.

L'instrument dont je me suis presque toujours servi diffère totalement, quant au principe, des thermomètres et thermoscopes ordinaires, car il donne la valeur cherchée par le mouvement d'une aiguille aimantée, sortant de sa position naturelle d'équilibre en vertu d'un courant électrique que développe l'action de la chaleur dans l'intérieur d'un faisceau composé de deux métaux différents; tandis que tous les anciens appareils thermoscopiques marquent les températures au moyen d'un fluide dont la dilatation ou la contraction est rendue plus ou moins apparente par la forme des récipients.

Mais l'intensité des courants thermo-électriques varie-t-elle toujours en proportion de la température?

Telle est la question qu'on a d'abord posée, et

qui semble avoir reçu une solution négative par les recherches expérimentales de plusieurs physiciens. Les ennemis naturels de toute idée neuve ayant quelque chance de succès en tirèrent aussitôt la conséquence que les mesures fournies par mon instrument étaient inexactes.

Cependant le côté vulnérable d'une telle induction était manifeste. De ce que la température, c'est-à-dire la dilatation ou la contraction du mercure, ne se trouve pas, généralement parlant, concordante avec la marche des courants thermo-électriques, s'ensuit-il que l'accord des deux effets ne puisse avoir lieu relativement à la série, fort retreinte, des courants employés dans un appareil déterminé ? Non, sans doute.

Et, sans quitter le sujet qui nous occupe, il suffit de faire remarquer que l'ancien principe thermoscopique est lui-même sujet à de semblables anomalies. Ne sait-on pas que les variations de volume de l'eau, des huiles, de l'alcool, et du mercure lui-même, ne sont proportionnelles aux variations de volume de l'air, considéré comme le type normal, qu'entre certaines limites ?

Le problème se réduisait donc à prouver que la proportionnalité existe pour le cas particulier dont il s'agit; et nous verrons que, sous ce rapport, l'expérience est tout-à-fait explicite et décisive.

Mais, si l'objection tirée des différences observées

entre le développement général des courants thermo-électriques et la température n'a aucune valeur, il n'en est pas de même d'une difficulté beaucoup plus grave que l'on peut opposer à la détermination des rapports d'intensité calorifique obtenus au moyen d'un appareil thermoscopique quelconque.

Lorsqu'un physicien veut étudier certains faits qui exigent des températures différentes, il n'a nul besoin de savoir quelles sont les proportions de chaleur qui constituent chacune de ces températures; il lui suffit de posséder un appareil qui puisse les indiquer exactement.

Ainsi la science de la chaleur ordinaire veut des instruments parfaitement comparables et ne prend pas en considération les quantités relatives de l'agent qui correspondent à chacun de leurs degrés.

Les choses marchent précisément en sens inverse par rapport à l'étude du calorique rayonnant, étude dans laquelle la condition de la comparabilité des instruments est superflue, et la connaissance des quantités ou intensités relatives de chaleur propres aux divers rayons calorifiques, est indispensable.

Or, l'on n'a peut-être pas assez réfléchi, que les quantités de chaleur correspondantes aux divers points de la graduation thermométrique étant inconnues, les rapports d'intensité des rayons déduits des thermomètres ordinaires, ou de tout autre instrument destiné à la mesure des températures, ne pouvaient avoir qu'une valeur hypothétique.

J'ai tâché de résoudre la question relativement à mon thermoscope électro-magnétique, et je crois pouvoir affirmer que j'y suis parvenu d'une manière on ne peut plus satisfaisante. En effet, on trouvera dans l'un des premiers chapitres une expérience très-simple, qui met tout-à-fait hors de doute l'exactitude des indications que cet appareil fournit sur les intensités relatives des rayons calorifiques; et cela, sans le secours du thermomètre ou des thermoscopes à air, dont l'aptitude à l'évaluation de la chaleur rayonnante reste encore problématique, parce que les échelles de ces instruments embrassant des intervalles de température énormes par rapport au thermoscope électro-magnétique, leur marche concordante avec celui-ci ne fournit aucun argument sur la nature des indications générales. C'est ainsi que les directions sensiblement rectilignes et coincidentes, pour une petite étendue, de plusieurs courbes douées d'une faible courbure ne signifient point que leur superposition apparente avec la ligne droite doive se prolonger nécessairement au-delà des limites observées.

Telles sont les explications que j'ai cru devoir donner sur l'origine, le but et la nature de cet ouvrage. Aucune peine n'a été épargnée pour en rendre l'exposition simple, claire et bien coordonnée dans toutes ses parties. Les imperfections, qui malheureusement peut-être s'y trouveront encore, ne sauraient donc provenir que de la faiblesse de mes

moyens intellectuels ou de mon inexpérience dans l'idiome français (*), jamais d'un manque d'application ou de soin. Et, à cet égard, quelque faible que puisse être le mérite de mon travail, j'ose espérer qu'il fixera l'attention du public impartial et qu'il obtiendra toute sa bienveillance.

(*) Une partie de mes recherches sur la chaleur ayant été rédigée et publiée en français et l'autre en italien, j'ai pu me convaincre, par les traductions et par les commentaires, que la série de mes mémoires écrits en italien a causé beaucoup plus d'erreurs et de tristes méprises que celle écrite en langue française. Voilà pourquoi je me suis décidé à écrire, dans une langue qui n'est pas la mienne, un ouvrage adressé aux professeurs, aux étudiants et aux amateurs de physique de tous les pays.

N. B. *Les deux parties, ou soit les deux volumes, dont se composera ce traité de la thermochrôse sont divisés en chapitres et en paragraphes. Chaque chapitre est immédiatement suivi de son titre général et du sommaire des matières que contient l'ensemble de ses paragraphes. Chaque paragraphe porte en tête le titre spécial du sujet qui s'y trouve développé.*

Quant aux notes, répandues çà et là dans le corps de l'ouvrage, on les a partagées en deux catégories, savoir : 1.° *celles qui se rapportent aux renvois, aux étymologies et aux citations des mémoires relatifs aux propositions énoncées ;* 2.° *celles qui contiennent le développement, plus ou moins complet, de ces mêmes propositions et des sujets ayant avec elles des rapports intimes. Les premières sont indiquées par des astérisques; les secondes portent, comme signes de rappel, la série progressive des nombres entiers.*

On trouvera à la fin de chaque volume une table raisonnée de toutes les matières traitées et dans le texte et dans les notes de la seconde catégorie, avec les indications des pages correspondantes.

LA THERMOCHRÔSE

OU

LA COLORATION CALORIFIQUE

CHAPITRE PREMIER

DES INSTRUMENTS PROPRES A MESURER LA CHALEUR RAYONNANTE.

Considérations générales. Dilatation des corps par l'action de la chaleur. Thermomètre à air, thermomètre différentiel, thermoscope et oethrioscope; modifications qu'il faut introduire dans ces divers appareils pour les adapter aux mesures des radiations calorifiques. Courants électriques excités par la chaleur; moyens de multiplier leurs actions sur les aiguilles aimantées. Thermomultiplicateur; sa construction détaillée; rapports qui existent entre ses indications et les forces thermo-électriques correspondantes. Avantages du thermomultiplicateur sur les thermomètres et les thermoscopes à air. Marche comparée de ces deux classes d'instruments.

§. I.

Causes qui rendent la chaleur à l'état libre ou rayonnant moins familière que dans les cas ordinaires où elle se trouve accouplée à la matière pondérable.

Tout le monde a une idée nette de la *chaleur de conductibilité*, de cette chaleur qui se transmet d'un corps à l'autre par le contact de leurs particules.

On comprend parfaitement que l'air d'un appartement,

l'eau d'un bain, l'atmosphère libre de la campagne soient pour nous plus ou moins chauds, selon la quantité de chaleur qui a pénétré dans leur substance par l'action des sources calorifiques naturelles ou artificielles, chaleur qu'ils nous transmettent ensuite *au moyen du contact*. On comprend aussi qu'en touchant un corps d'une température plus ou moins élevée que celle de la main, il nous paraisse chaud ou froid selon que le calorique passe du corps à la main, ou de la main au corps. On conçoit enfin que l'une et l'autre de ces deux sensations doivent dépendre de la quantité de chaleur échangée, dans un temps donné, entre le corps touché et la main qui le touche; que, par conséquent, si l'on a plusieurs substances refroidies d'un même nombre de degrés au-dessous de la température du corps humain, le métal, qui de sa nature est excellent conducteur du calorique, nous semblera plus froid que le marbre, qui est moins bon conducteur; et que, par la même raison, le marbre nous paraîtra plus froid que le carton ou le bois; et vice versâ, en supposant ces différentes substances échauffées d'un même nombre de degrés au-dessus de notre propre température, on se rend aisément raison de ce que le bois semble moins chaud que le marbre, et le marbre moins chaud que le métal.

Chacun s'explique avec la plus grande facilité la propagation lente de la chaleur dans l'intérieur d'une barre métallique ayant une de ses extrémités en contact avec les charbons incandescents ou toute autre source calorifique, et le décroissement de température qui s'y observe à mesure que l'on s'éloigne de cette source; puisque l'agent quelconque qui produit la chaleur, devant se propager de l'une à l'autre tranche transversale de la barre, ces transmissions

successives ne sauraient s'accomplir sans une perte de force et de temps.

Les phénomènes qui constituent le rayonnement calorifique ne sont pas, au premier abord, d'une si facile intelligence.

En effet, comme la manifestation de la chaleur ordinaire exige toujours le contact du corps chaud, on se décide difficilement à croire que cet agent puisse se séparer de la matière pondérable et venir nous frapper à distance. Il est vrai que nous sommes forcés d'accepter le fait quant au rayonnement solaire. Mais l'impossibilité de séparer le pouvoir échauffant du pouvoir éclairant, la grande importance de celui-ci, l'extrême facilité d'en suivre la marche et les modifications au moyen de l'organe si délicat de la vue, nous font admettre, comme par instinct, que l'action calorifique des rayons lumineux est une espèce toute particulière de chaleur entraînée ou excitée par la lumière, qui n'a aucun rapport avec le rayonnement pur et simple des corps chauffés au-dessous de l'incandescence.

Cette croyance, simplement instinctive, se fortifie par l'idée de l'homogénéité que nous supposons naturellement à un agent invisible ne produisant sur nous que des sensations de quantité parfaitement semblables à celles qui nous sont communiquées par le contact des corps plus ou moins chauds.

L'inexactitude de ces opinions et de ces conséquences sera amplement démontrée dans le cours de cet ouvrage, et par l'opposition des lois qui régissent la propagation de la chaleur à l'état ordinaire et à l'état rayonnant, et par la ressemblance qu'offrent les propriétés générales et particulières des radiations calorifiques avec les propriétés analogues des radiations lumineuses.

Nous verrons que lorsque la chaleur pure, sans aucun mélange de lumière, se trouve à l'état rayonnant, elle n'exige point pour se transmettre le concours de la matière pesante; qu'elle n'est point forcée de suivre certains sens déterminés dans les fluides; qu'elle ne se propage pas lentement de l'une à l'autre surface des milieux et n'éprouve aucune perte d'intensité ou de temps par le changement ou le transport relatif des diverses parties dont se compose la couche traversée. Mais que ses affections de propagation ressemblent parfaitement à celles de la lumière; et que, soit dans le vide, soit dans les corps quelconques capables de le transmettre, un rayon calorifique se meut exactement comme un rayon lumineux, selon la seule direction rectiligne, en un instant imperceptible, et indépendamment du repos ou de l'agitation des particules pondérables.

Nous verrons enfin, que la chaleur rayonnante obscure se compose, comme la lumière, de plusieurs espèces de rayons élémentaires et se distingue encore nettement sous ce rapport de la chaleur de contact, qui peut bien avoir différents degrés d'énergie, mais qui conserve en toute occasion les mêmes qualités, et se montre ainsi complétement homogène.

Mais pour bien comprendre les démonstrations de ces faits et étudier avec fruit les propriétés des radiations calorifiques, nous devons décrire d'abord les moyens que l'on emploie pour en reconnaître la présence et en déterminer les diverses gradations d'intensité.

La sensation plus ou moins vive éprouvée à une certaine distance des sources calorifiques ne donnerait que des différences grossières, souvent erronées, et toujours impossibles à traduire en nombres. Pour comparer les intensités

des rayons de chaleur on est donc forcé de recourir à d'autres moyens. Or, parmi les effets que ces rayons produisent sur les corps, deux seuls sont susceptibles de remplir le but en question, savoir : l'augmentation de volume, et l'action que les courants thermo-électriques exercent sur l'aiguille aimantée. De là, la division des instruments destinés à la mesure du calorique rayonnant en *thermoscopes* ou *thermactinomètres* (*) de dilatation, et en *thermoscopes* ou *thermactinomètres électro-magnétiques*.

§. 2.

Instruments qui donnent les rapports des rayons calorifiques au moyen de la dilatation des corps.

Les appareils thermoscopiques de la première classe, c'est-à-dire ceux qui sont fondés sur l'augmentation de volume que les corps éprouvent par l'absorption de la chaleur rayonnante, ressemblent pour le principe aux thermomètres proprement dits; mais ils en diffèrent par quelques détails de construction; et cela à cause de la nature même de l'agent qu'ils sont destinés à mesurer, et de son mode de propagation, si différent de celui qui appartient à la chaleur ordinaire. Et d'abord, ils doivent être beaucoup plus sensibles, non seulement pour apprécier le rayonnement des sources faibles, mais encore pour étudier les rayons des sources très-énergiques à une distance considérable de leur origine, et opérer ainsi sur la radiation affaiblie par l'éloignement; ce qui présente, comme nous le verrons bientôt, de grands avantages. Voilà pourquoi, au lieu de liquides, on emploie dans leur con-

(*) *Du grec* termon *chaud, chaleur,* actin *rayon, et* metron *mesure.*

struction l'air, dont la dilatation surpasse trois fois celle de l'alcool, et dix-huit fois celle du mercure.

La construction la plus simple du thermactinomètre à air est représentée dans la figure n. 1 (*); elle ne diffère pas du premier thermomètre inventé par Drebbel d'Alkmaër au commencement du dix-septième siècle. C'est, tout simplement, un récipient thermométrique renversé, à extrémité ouverte, et plongeant dans un liquide coloré qui s'élève jusqu'à une certaine hauteur dans le tube, lorsqu'on effectue l'immersion après avoir légèrement chauffé la boule. Pour maintenir l'instrument dans cette position, on introduit le liquide dans une espèce de flacon C portant un bouchon de liége B, à travers lequel on fait passer le tube ; un trou latéral pratiqué dans le même bouchon sert à maintenir une libre communication entre l'intérieur et l'extérieur du flacon. L'air emprisonné en A se dilate plus ou moins par l'action des rayons calorifiques qui viennent frapper son enveloppe, et déprime d'une quantité correspondante l'extrémité E de la colonne soulevée. En plaçant à côté une échelle divisée en parties d'égale capacité, et en observant les effets produits dans un temps donné, on peut donc trouver, avec cet appareil, les rapports d'intensité entre deux rayons de chaleur que l'on fait arriver successivement sur le corps thermoscopique.

Mais pour atteindre ce but deux conditions sont nécessaires : la constance de la pression de l'atmosphère, et la constance de température du milieu ambiant. En effet, la colonne liquide ne se soutient dans le tube qu'en vertu de l'équilibre établi entre la pression atmosphérique et l'élasticité de l'air renfermé dans la boule. Si la première augmente ou si

(*) *Toutes les fois que les figures seront numérotées il faudra les chercher dans la planche placée à la fin du volume.*

la seconde diminue par le refroidissement du milieu ambiant, la colonne monte dans le tube; elle descend, au contraire, lorsque la pression de l'air diminue ou lorsque l'élasticité du fluide renfermé dans la boule s'accroît en vertu de l'élévation de la température ambiante.

Pour remédier à ces inconvénients, Leslie inventa son *thermomètre différentiel* qui se compose de deux réservoirs sphériques, semblables au précédent, réunis ensemble par un seul tube à branches parallèles, replié à sa partie inférieure, et contenant un liquide coloré, qui remplit entièrement l'une des branches, et s'élève dans l'autre à une hauteur plus ou moins grande (fig. 2). Tout étant hermétiquement fermé, on conçoit que la pression atmosphérique ne peut plus exercer la moindre influence sur les deux masses d'air contenues dans les boules, ni altérer, par conséquent, la hauteur de la colonne liquide. Une augmentation ou une diminution de température ne saurait pas non plus affecter les conditions d'équilibre du système; car elle agit uniformément sur les deux réservoirs, et modifie d'une quantité égale l'élasticité de l'air intérieur.

On voit par là que l'air de la boule A' sert à compenser les variations de volume que les changements de température et de pression atmosphérique, survenus pendant les expériences, communiqueraient à l'air de la boule A, destinée à explorer les divers degrés d'énergie des rayons de chaleur.

Ainsi, en faisant tomber successivement les différentes radiations calorifiques en A, et en observant les espaces parcourus par le liquide en E, on pourra comparer les effets de ces radiations, sans craindre que les résultats soient affectés par les variations de température et de pression atmosphérique.

Ces mêmes avantages se retrouvent aussi dans le *thermoscope* de Rumford, qui est d'une structure tout-à-fait analogue au thermomètre différentiel de Leslie et en diffère seulement par rapport au tube et à la longueur de la colonne liquide; car les deux branches au lieu de former une courbure étroite à la partie inférieure, se replient à angle droit, et laissent entre elles une portion horizontale assez étendue, au milieu de laquelle se trouve placée une petite colonne L de liquide coloré, qui sépare l'air des deux boules A, A', et sert à mesurer leurs différences de dilatation (fig. 3).

Cette disposition, qui, dans les différents points de la marche maintient constante la pression de l'index liquide sur les masses d'air des deux réservoirs, est peut-être préférable à celle adoptée dans l'instrument de Leslie, où la pression, dérivant de la différence de niveau du liquide dans les deux tubes, varie évidemment avec l'action calorifique observée.

Le thermoscope de Rumford porte à un angle du tube un petit réservoir P plein de liquide, avec lequel on forme l'index de l'instrument. A cet effet on chauffe très-légèrement la boule A' avec la chaleur de la main placée à une certaine distance, et on chasse ainsi une portion de l'air de A' en A. Alors en retirant la main et en soulevant quelque peu le réservoir, on fait pénétrer une petite colonne liquide dans le tube horizontal; et l'air, qui tend à reprendre sa distribution primitive, pousse devant soi l'index vers A' jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse entre l'élasticité de l'air contenu dans les deux boules. En opérant convenablement on peut faire arrêter l'index où l'on veut qu'il se tienne sur le tube.

Il existe enfin une troisième forme de thermactinomètre

de dilatation, à laquelle Leslie a donné le nom d'*æthrioscope*. Cet instrument, employé à la mesure de la chaleur rayonnante vers le ciel, se compose de deux boules A, A', (fig. 4), communiquant entre elles par un tube droit situé verticalement pendant les expériences. La boule supérieure, beaucoup plus petite que l'inférieure, a son centre placé dans l'un des foyers d'un miroir elliptique en métal, coupé perpendiculairement à l'axe selon un plan passant par le foyer opposé, et muni d'un couvercle que l'on ouvre lorsqu'on veut mettre l'instrument en activité. La boule inférieure est entièrement couverte par une enveloppe métallique. Le tube porte une échelle divisée et un index liquide semblable à celui du thermoscope de Rumford. La figure représente l'appareil sectionné verticalement, afin de pouvoir observer sa disposition intérieure.

Cet instrument a le défaut de ne pas être entièrement soustrait aux variations brusques de la température atmosphérique. Pour s'en convaincre il suffit de remarquer que les masses d'air et de verre, dont les boules se composent, étant différentes, elles ne peuvent ressentir avec la même intensité les changements de chaleur qui apparaissent soudainement dans le milieu ambiant; il y aura donc une dilatation ou une contraction plus prompte d'un côté que de l'autre, et l'action des rayons incidents sur le miroir et la boule supérieure sera troublée. On peut démontrer aisément que les choses se passent comme je viens de le dire, en laissant quelque temps exposé à l'atmosphère froide du dehors l'æthrioscope fermé, et en le transportant ensuite, toujours fermé, dans l'intérieur d'un appartement échauffé; car alors on verra l'index descendre d'abord d'un certain nombre de degrés, et remonter ensuite vers sa position d'équilibre.

La sensibilité des trois appareils compensés que nous venons d'examiner, dépendant du rapport de capacité des réservoirs aux tubes de communication, peut varier entre des limites très-étendues; et comme il est extrêmement difficile, pour ne pas dire impossible, de souffler des boules de même capacité aux bouts des divers tubes de mêmes diamètres, la question de savoir si le thermoscope de Rumford et l'æthrioscope sont plus sensibles que le thermomètre différentiel de Leslie ne saurait se résoudre exactement par la voïe de l'expérience. Seulement on peut dire qu'à dimensions égales les deux premiers appareils ont peut-être quelque avantage sur le dernier en vertu de la plus grande mobilité de leur index; avantage qui n'est pourtant pas aussi grand qu'on pourrait l'imaginer, à cause de la nécessité où l'on se trouve d'employer dans la construction de l'æthrioscope et du thermoscope de Rumford l'acide sulfurique, afin d'éviter l'évaporation des gouttelettes mobiles qui servent d'indicateurs; car cet acide éprouve contre les parois des tubes de verre un frottement beaucoup plus fort que l'alcool, dont se compose la colonne liquide du thermomètre différentiel.

Remarquons toutefois que pour avoir un haut degré de sensibilité dans ces trois instruments il faut donner aux boules des dimensions beaucoup plus grandes que celles des thermomètres ordinaires, et qu'une telle ampleur du corps thermoscopique rend les instruments impropres à la plus grande partie des expériences sur la chaleur rayonnante, qui exigent un certain degré de précision.

Remarquons encore que le liquide, comprimant l'air de la boule vers laquelle il se dirige, éprouve une résistance croissante avec l'espace parcouru, et que, sous ce rapport, le thermoscope simple de Drebbel, dans lequel la dilatation

s'accomplit sans exercer aucune compression, a un avantage incontestable sur les thermoscopes compensés. Cet accroissement de résistance, qui tient à la nature même des instruments à double réservoir, rend l'unité de l'espace parcouru par la colonne liquide de moins en moins étendue, de manière que les degrés successifs ont nécessairement une longueur décroissante. Si les rapports de capacité des réservoirs aux tubes de communication étaient connus, on pourrait avoir, au moyen du calcul, la valeur des différentes parties de l'échelle appartenant à chaque appareil; mais ces rapports sont impossibles à déterminer, vu la difficulté de se procurer des tubes parfaitement cylindriques, et de souffler à leurs extrémités des boules de la forme précise d'une sphère: on est donc forcé de résoudre la question par la voie de l'expérience.

A cet effet, imaginons que l'on environne de glace fondante la boule *compensatrice* de l'appareil, et que l'on plonge dans l'eau à zéro la boule active, c'est-à-dire, la boule qui doit recevoir le rayonnement calorifique. En chauffant cette eau par petites fractions égales de température, l'index thermoscopique décrira des espaces différents et de moins en moins étendus, si le tube est parfaitement cylindrique. Ces espaces, marqués sur l'instrument, indiqueront des échauffements doubles, triples, quadruples de l'air contenu dans la boule active, et fourniront ainsi les rapports d'intensité des diverses radiations calorifiques incidentes.

Mais une semblable opération exige des instruments comparables à eux-mêmes, constants dans leurs indications, et le thermoscope et l'æthrioscope n'ont ni l'une ni l'autre de ces deux qualités; car l'index marche par bonds, à cause du frottement considérable qu'il éprouve le long du tube;

au moindre excès de chaleur il rentre dans le réservoir à liquide, ou se dissout dans l'une des boules, et reparaît ensuite subdivisé en petites fractions. De plus, quand même on parviendrait à maintenir l' index intact, la grande sensibilité de ces instruments exigerait que l'échauffement des boules, pendant les expériences de comparaison, procédât par fractions si petites du degré thermométrique que l'opération deviendrait tout-à-fait impraticable.

Il faut donc se contenter d'appliquer ce procédé de graduation aux instruments peu sensibles, et munir les autres d' échelles arbitraires, et tout au plus diviser leurs tubes en parties d'égale capacité avant de souffler des boules à leurs extrémités. Alors en supposant excessivement petites, et par conséquent susceptibles d'être négligées, les causes de variation indiquées ci-dessus (supposition qui est peut-être admissible pour certains cas), on obtiendra les rapports de quantité des rayons incidents sur la boule active de l'instrument par l'observation des espaces que l'index décrit successivement dans le tube.

Il importe peu, d'ailleurs, que l'on n'arrive point à déterminer le rapport qui existe entre les degrés des thermoscopes employés à la mesure du rayonnement calorifique et la graduation du thermomètre, car la connaissance des températures proprement dites (donnée de la plus grande importance pour les phénomènes de la chaleur ordinaire), est tout-à-fait superflue pour la science de la chaleur rayonnante. En effet, que se propose-t-on d' étudier dans cette science ? Les propriétés générales et particulières des différentes espèces de rayons de chaleur. Or, il est vrai que le rayonnement calorifique fait monter plus ou moins le thermomètre, selon que son intensité est plus ou moins grande;

mais il est tout aussi vrai, d'autre part, que son action sur le thermomètre varie par le seul fait d'un changement de dimension ou de forme dans la source de chaleur et dans le corps thermoscopique; qu'elle augmente ou qu'elle diminue selon qu'on se rapproche ou qu'on s'éloigne du foyer rayonnant ; que toutes ces variations de *quantité* n'ont aucune influence sur la *qualité* et que le rayonnement possède enfin les mêmes propriétés spécifiques et générales à une distance quelconque de la source. Ainsi la lumière d'un corps en combustion analysée par le prisme, ou par l'absorption des milieux colorés, donne toujours les mêmes éléments et se montre toujours soumise aux mêmes lois de transmission, de réflexion, de réfraction, d'interférence et de polarisation, quel que soit le degré de sensibilité dont est doué l'œil de l'observateur et sa distance au corps lumineux.

Mais s'il est tout-à-fait inutile de savoir à quel degré de l'échelle thermométrique correspond la chaleur incidente sur le thermactinomètre à l'endroit où l'on opère, il importe beaucoup d'expérimenter à un certain éloignement de la source calorifique; car il faut que les rayons explorés parviennent sur l'instrument sans aucun mélange des radiations dérivées de l'échauffement des corps soumis aux expériences. Or l'on ne saurait remplir cette condition sans une grande sensibilité dans l'appareil thermoscopique.

Supposons, en effet, qu'il s'agisse de mesurer la quantité de chaleur rayonnante réfléchie par un corps poli. On sait que la chaleur incidente n'est pas toute réfléchie : une certaine portion est absorbée par le réflecteur, qui, exposé pendant quelque temps à la radiation de la source, s'échauffe et devient ainsi une nouvelle source de chaleur agissant à son tour sur l'instrument, et venant augmenter l'effet des rayons

réfléchis. Si le thermactinomètre est peu sensible, il faudra approcher beaucoup la surface réfléchissante du foyer calorifique afin d'avoir des rayons très-intenses; et, par la même raison, on sera obligé de mettre le thermoscope aussi près que possible du réflecteur; il faudra enfin attendre un temps considérable pour que l'instrument marque la valeur des rayons réfléchis. Or toutes ces circonstances réunies tendent évidemment à rendre très-sensible l'action de l'échauffement du réflecteur sur le thermactinomètre.

Mais lorsque l'instrument est doué d'une grande délicatesse et d'une grande promptitude dans ses indications, on peut mesurer la force du rayonnement réfléchi à une distance considérable du corps poli, qui peut être lui-même fort éloigné de la source de chaleur. Enfin quelques instants d'exposition suffisent pour que l'instrument indique la valeur cherchée de la réflexion, c'est-à-dire, qu'alors on se trouve dans les circonstances les plus favorables pour diminuer, autant que possible, l'action due à l'échauffement du miroir.

La science possède aujourd'hui dans les thermactinomètres électro-magnétiques des instruments doués de toutes les qualités requises à l'accomplissement des conditions signalées; et nous verrons plus tard comment on peut démontrer que, dans les diverses dispositions expérimentales adoptées pendant les mesures prises au moyen de ces instruments, la chaleur absorbée par le réflecteur, ou par le corps quelconque qui modifie la marche ou la constitution du rayonnement direct de la source, n'a aucune influence appréciable. Mais, avant de passer à la description de ces instruments, je ferai encore quelques remarques sur l'usage des thermactinomètres de dilatation.

Tout le monde a sans doute observé la promptitude, ou

pour mieux dire l'instantanéité avec laquelle les rayons solaires pénètrent dans les appartements à travers les carreaux d'une croisée. On ne sera donc pas étonné en apprenant que certains rayons des sources terrestres possèdent la même propriété de *porter immédiatement* leur chaleur au-delà du verre, et d'autres substances diaphanes; et comme les thermoscopes sont destinés à comparer ensemble les forces de toute sorte de radiations calorifiques, on en conclura de suite *la nécessité* d'enduire la surface de leurs réservoirs d'une couche de noir de fumée; car cette couche arrêtera la chaleur rayonnante d'une origine quelconque, l'absorbera, et la transmettra ensuite au verre et à l'air intérieur.

C'est pour avoir manqué à cette précaution indispensable dans l'usage des thermactinomètres à air, que plusieurs observateurs ont été trompés par les indications négatives de ces instruments. En n'apercevant aucun mouvement dans la colonne liquide du thermoscope à boule libre, sous l'action de certains rayons, quelle que fût la sensibilité de l'appareil, ils en conclurent que ces rayons n'avaient aucune température propre, ou que du moins ils étaient doués d'une chaleur insensible aux moyens thermoscopiques connus. Mais il est fort probable qu'ils auraient obtenu des résultats opposés en noircissant les boules de leurs thermoscopes.

Pour montrer la possibilité de ces effets contraires il n'y a qu'à faire l'expérience suivante. On prend deux thermomètres simples de Drebbel ayant des dimensions égales autant que possible, l'un nu, l'autre noirci. On les pose sur un même soutien, fort rapprochés entre eux, et on leur présente, à la distance de deux à trois pieds, un fer chaud. *Les deux colonnes liquides descendent ensemble avec*

une grande vitesse. Le fer étant retiré, on y substitue une lampe d'Argant munie d'une lentille de verre qui produise, par un ajustement convenable, le même degré d'intensité lumineuse sur les deux boules thermométriques, et l'on voit *la colonne liquide du thermomètre noirci descendre avec rapidité, tandis que celle qui appartient au thermomètre libre reste tout-à-fait stationnaire.*

Il y a enfin une dernière précaution à prendre dans l'emploi des thermoscopes à air: c'est de les soustraire autant que possible à l'influence de la chaleur rayonnée par l'observateur et les corps environnants. On y parvient avec facilité en enveloppant les boules ou réservoirs thermoscopiques de légers tubes de cuivre poli disposés horizontalement, fermés d'un côté, ouverts de l'autre, mais pouvant se fermer complétement au besoin par une lame de métal fixée à l'extrémité ouverte du tube et mobile dans un plan perpendiculaire à l'axe. Pour appliquer ces enveloppes on y pratique une fente qui part de l'ouverture et s'arrête à la moitié du tube métallique ; puis on introduit la boule dans l'intérieur, en faisant pénétrer le tube de verre qui la supporte dans la fente au fond de laquelle est soudé un petit appendice, que l'on fixe au tube de verre avec de la cire d'Espagne. Alors l'instrument ne peut recevoir que les rayons de la source vers laquelle on dirige l'ouverture; ceux des corps environnants viennent frapper sur l'enveloppe et sont renvoyés par réflexion. On trouvera à la fin du volume (fig. 5) la représentation d'un thermoscope à air ainsi monté (1).

(1) La nécessité de soustraire les instruments thermoscopiques à enveloppes de verre, naturelles ou enduites de noir de fumée, à toute espèce de rayonnement calorifique différent de celui que l'on explore, était évidente; et cependant, comme les premiers observateurs qui se

Passons aux thermactinomètres de la seconde classe. Ces appareils thermoscopiques s'écartent totalement, par le principe et la structure, de ceux que nous venons d'examiner.

sont occupés de cette branche de physique n'en ont fait aucune mention, elle a été complétement négligée jusqu'à ce jour!

On a négligé aussi de prendre en considération l'influence que la position et l'étendue plus ou moins grande des surfaces rayonnantes exercent sur la température des couches d'air qui les environnent, influence qui, dans certains cas, produit des effets de la plus haute importance.

De là une foule de méprises dans les phénomènes qui tirent leur origine de la chaleur rayonnante, et notamment dans les faits et les raisonnements relatifs au rayonnement nocturne des corps.

On pose un thermomètre sur l'herbe ou sur un corps rayonnant quelconque situé près de la surface terrestre; on en suspend un autre dans l'air à trois ou quatre pieds de hauteur sous un petit toit métallique; et on suppose que la différence de leurs indications donne le degré de refroidissement conçu par le corps en vertu de son rayonnement vers les espaces célestes.

Mais peut-on admettre que les couches d'air dans lesquelles plongent les deux thermomètres aient la même température, lorsque l'une est libre, et l'autre remplie d'une infinité de feuilles refroidies par le rayonnement? Et n'est-il pas évident que l'indication du premier thermomètre représente la moyenne des effets résultants du *rayonnement du verre vers le ciel* et des contacts de l'herbe et *de l'air environnant*; et que l'indication du second thermomètre n'est, elle aussi, qu'une moyenne résultant *du contact de l'air ambiant* et de la *communication rayonnante du verre limitée aux seuls objets terrestres?*

Ces expériences ne conduisent donc nullement à la conséquence qu'on s'est permis d'en déduire; et pour entreprendre des recherches exactes sur le refroidissement des corps exposés pendant la nuit à l'air libre de la campagne, il faut d'abord avoir soin *de rendre sensiblement nul le rayonnement de la surface thermométrique au moyen d'étuis métalliques qui enveloppent les réservoirs et les tubes de ces instruments;* et il faut, en outre, *placer le thermomètre destiné à l'évaluation de la température atmosphérique dans la même couche d'air*

En effet, ce n'est plus la variation de volume d'un fluide qui indique l'intensité du rayonnement, mais la présence d'un courant d'électricité. La force de la radiation ne se mesure

où se trouve le thermomètre qui est en contact avec le corps rayonnant.

En partant de ces principes, ou pour mieux dire de ces *axiomes de physique*, j'ai entrepris, sur le rayonnement nocturne des corps, une série d'expériences qui m'ont convaincu de la nécessité de renoncer complétement à l'idée dominante sur *le rôle passif que jouerait la présence de l'air* dans les phénomènes de refroidissement qui précèdent et accompagnent la formation de la rosée.

Comme la portée des observations qui m'ont démontré cette vérité ne me paraît pas encore bien comprise par la généralité des météorologistes, je vais en donner ici un résumé succinct.

Un thermomètre muni de son enveloppe métallique et un thermomètre nu, ou couvert de noir de fumée (substance douée d'un pouvoir rayonnant qui est, pour le moins, tout aussi énergique que celui des feuilles végétales), étant exposés de nuit à l'air libre, l'un à côté de l'autre, par un temps calme et serein, marquent une différence, *qui est sensiblement la même, quelle que soit leur distance au sol et la température de l'atmosphère.* Cette différence n'atteint pas deux degrés centigrades sous le ciel de Naples, dont la pureté est, pour ainsi dire, proverbiale.

D'autre part, si l'on place un thermomètre enveloppé de métal dans la couche d'air qui contient les sommités de l'herbe, en évitant soigneusement tout contact avec les tiges et les feuilles, et un second thermomètre monté de la même manière à une hauteur de quatre pieds, on trouve, dans les circonstances favorables, la température de celui-ci plus élevée de 8 à 10 degrés que celle de l'autre.

Comment se fait-il qu'un froid de 10 à 12 degrés soit engendré par un effet de rayonnement qui, dans les mêmes circonstances favorables, ne dépasse jamais 2 degrés ?

Cet excès de froid serait évidemment inexplicable par la théorie de la radiation nocturne des corps vers les espaces célestes telle qu'on l'a conçue jusqu'à présent.

Mais si l'on réfléchit que la couche d'air qui contient l'herbe, dénué

pas directement en vertu des changements opérés sur la substance sensible aux effets de la chaleur rayonnante; mais elle est appréciée sur un instrument séparé communiquant avec

dans ses mouvements par l'affinité et les obstacles mécaniques que lui opposent les feuilles et les tiges des plantes herbacées, est en outre soutenue par le sol et se maintient ainsi pendant longtemps en présence des substances refroidies par le rayonnement, tandis que l'air dans lequel est placé le thermomètre isolé à quatre pieds de hauteur doit nécessairement quitter, en se condensant, le corps qui rayonne vers l'espace, on comprendra aisément la véritable cause du phénomène.

En effet, il suffira de rappeller la proposition que nous venons d'énoncer, pour en déduire cette conséquence : qu'après avoir reçu, au moyen du contact, le faible degré de froid engendré dans l'herbe par sa radiation vers le ciel serein, *l'air stagnant*, pour ainsi dire, *dans la prairie y provoquera aussitôt un nouveau degré de froid :* car LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA SUBSTANCE RAYONNANTE ET L'AIR AMBIANT DOIT SE MAINTENIR CONSTANTE. Or ce second degré de froid résultant du rayonnement de l'herbe se communiquera à l'air, *qui réagira de nouveau sur l'herbe ;* et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'équilibre de température s'ensuive par le contact de la terre et le mélange des couches voisines de l'atmosphère.

C'est ainsi que l'herbe et l'air qui repose sur le sol acquièrent une température inférieure à celle des couches plus mobiles et plus élevées de ce fluide, dans lesquelles des thermomètres découverts, peints au noir de fumée, placés sous des abris, ou totalement enveloppés par un étui métallique, marqueront bien entre eux de petites différences de un à deux degrés, comme s'ils étaient situés près de la surface terrestre, mais se tiendront tous, par un temps parfaitement calme et serein, huit à dix degrés plus haut que les thermomètres de même espèce plongés dans l'herbe de la prairie.

La distribution nocturne des températures à différentes hauteurs de l'atmosphère et la cause dont elle dérive étant bien établies, on comprend de suite pourquoi les végétaux, et les autres corps exposés de nuit dans la campagne à l'aspect du ciel serein, se couvrent plus promptement et plus abondamment de rosée près de la surface terrestre qu'à une certaine élévation. En effet, deux corps égaux et é-

le corps thermoscopique moyennant deux fils de métal; combinaison très-heureuse qui, outre l'avantage immense de pouvoir imprimer toute sorte de mouvements au corps thermo-

galement placés par rapport à la voûte céleste, dont l'un serait tout près des sommités de l'herbe et l'autre à une hauteur de quatre à cinq pieds, se refroidiront, en rayonnant vers l'espace, de la même quantité au-dessous de l'air qui les entoure. Mais la couche atmosphérique dans laquelle plonge le corps inférieur étant réduite à une température beaucoup plus basse que la couche supérieure, donnera une précipitation d'eau plus prompte et plus abondante.

En d'autres termes, l'air qui possède de jour le même degré de chaleur à la surface d'un pré, et dans la couche supérieure, comme on peut aisément s'en convaincre au moyen des observations thermométriques, acquiert de nuit une température beaucoup plus basse autour des sommités de l'herbe qu'à une élévation de quatre à cinq pieds. Or, comme l'abaissement de température augmente l'humidité de l'air, le petit degré de froid que prennent les corps relativement au fluide qui les entoure, par suite de leur rayonnement vers le ciel, précipitera une quantité de rosée beaucoup plus grande dans la couche inférieure, que dans la couche supérieure. Tout ceci n'est qu'une conséquence nécessaire de la réaction que l'air, refroidi par le contact, exerce sur la température propre de l'herbe.

C'est encore en vertu de la réaction exercée par l'air sur le corps rayonnant, qu'un thermomètre enveloppé d'un flocon de laine (substance douée du même pouvoir émissif que le noir de fumée), se refroidit, pendant les nuits calmes et pures, deux à trois fois plus qu'un thermomètre noirci, et se couvre par conséquent d'une quantité beaucoup plus abondante de rosée. Pour en avoir la preuve il n'y a qu'à répéter relativement au flocon de laine qui entoure le premier thermomètre le même raisonnement appliqué tantôt à l'herbe de la prairie.

Ces exemples suffiront, je l'espère, pour montrer la vérité de notre proposition, savoir: que tout en étant privé du pouvoir rayonnant, *l'air joue un rôle très actif dans les phénomènes de refroidissement qui précèdent et accompagnent la formation de la rosée.* (Voir pour les détails des expériences les *Annales de Chimie et de Physique* de Paris, année 1848).

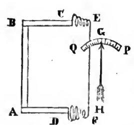
scopique sans communiquer les secousses produites à l'indicateur, permet aussi à l'observateur de lire à son aise les divisions marquées sur cette partie de l'instrument sans craindre que la chaleur propre de son corps influe sur les résultats. On ne pourrait toutefois comprendre à fond la structure et l'usage de ces appareils sans la connaissance de plusieurs faits électro-magnétiques, que nous allons tâcher de réunir dans le paragraphe suivant.

§. 3.

Notions sur les courants thermo-électriques, et leur application à la mesure des petites différences de température.

La nature de cet ouvrage ne nous permet pas une exposition complète des propriétés appartenant aux courants électriques excités par la chaleur. Nous allons cependant développer avec toute l'étendue convenable celles de ces propriétés qui se rapportent à notre but, et entrer dans les plus petits détails nécessaires pour bien comprendre les principes sur lesquels repose la construction des thermactinomètres électro-magnétiques.

Tous les métaux convenablement accouplés développent des courants électriques par l'action de la chaleur. Pour ne pas nous écarter inutilement de l'objet que nous avons en vue, et donner en même temps plus de clarté à l'exposition, nous prendrons toujours comme exemples le bismuth et l'antimoine, qui sont les métaux les plus énergiques pour ce genre d'action, et comme tels uniquement employés dans la structure des instruments destinés à l'étude de la chaleur rayonnante.



Soit AB un barreau de bismuth, AD, BC deux barreaux d'antimoine, CEFD un fil de cuivre ou d'argent qui réunit ensemble les extrémités libres de ces derniers barreaux, le tout en contact métallique, ou soudé bout à bout, comme le représente la figure.

Tant que les différentes parties de ce *circuit* sont à la même température, elles n'exercent aucune action sur une aiguille aimantée GH librement suspendue et horizontale, que nous supposerons indiquer le pôle boréal par sa pointe G. Mais si l'on vient à chauffer une des soudures du bismuth avec les barreaux d'antimoine, la soudure A, par exemple, et que l'on approche ensuite une portion EF du conducteur au-dessus ou au-dessous de l'aiguille, celle-ci dévie vers P dans le premier cas, et vers Q dans le second. Si, au lieu de tenir le fil horizontalement comme l'aiguille, on lui donne une direction verticale, le point E en haut, on voit encore l'aiguille dévier vers P ou vers Q selon que l'on présente le fil à l'extrémité G ou à l'extrémité opposée H.

Ces déviations, qui sont dues à un courant électrique excité dans le circuit ABCEFD par l'action de la chaleur, se font en sens contraire lorsqu'on renverse le courant, c'est-à-dire lorsqu'on retourne le fil EF, de manière à porter l'extrémité F en E, et vice versâ. Par conséquent, en renversant deux fois le fil, on pourra rendre conspirantes les quatre actions que nous venons de décrire, c'est-à-dire qu'on pourra les réduire toutes à faire dévier l'aiguille dans le même sens. Or il est facile de voir que cela se produit lorsqu'après avoir dirigé le fil au-dessous de l'aiguille, en allant de H à G, par

exemple, on le ploie pour le faire monter un peu, et le rappeler ensuite sur lui-même horizontalement au-dessus de l'aiguille et pour le replier enfin de nouveau en deçà de H, afin qu'il descende encore verticalement sans toucher l'extrémité initiale, de manière à former une espèce de courbe aux bouts détachés, un véritable tour de spire vertical entourant l'aiguille suspendue. En effet le côté horizontal inférieur de cette spire et le côté vertical ascendant font dévier déjà par eux-mêmes l'aiguille vers P, car ils ont les positions indiquées précédemment. Quant aux deux autres côtés ils doivent nécessairement faire dévier l'aiguille dans le même sens P, puisqu'ils sont renversés et que tantôt ils produisaient la déviation vers Q.

Si au lieu de porter la chaleur en A on chauffait B, il est évident qu'il se produirait dans le circuit un courant électrique contraire à celui que nous venons d'examiner par suite de la parfaite similitude qui existe entre les deux soudures B et A. Mais les quatre actions de notre spire agiraient toutes encore dans le même sens, et la déviation aurait lieu vers Q avec une intensité égale à celle qui poussait tantôt l'aiguille vers P.

Ainsi, en donnant au fil de cuivre ou d'argent dont est composé le conducteur, la forme d'une spire, on augmente toujours la déviation de l'aiguille aimantée, quelle que soit d'ailleurs la direction du courant électrique.

Ce concours de toutes les actions *déviatrices* émanées des différents côtés de la spire (concours dû à la nature *évolutive* ou *tourbillonnante* de la force électro-magnétique), nous donne le moyen d'augmenter immensément l'effet du courant et nous permet ainsi d'en découvrir les plus faibles traces, qui représentent dans notre cas particulier les moin-

dres différences de température entre les deux soudures A et B..

En effet, comme toutes les parties du fil ont les mêmes propriétés, si l'on forme une seconde, puis une troisième, puis une quatrième spire, et ainsi de suite, il est évident que toutes ces circonvolutions agiront de la même manière sur l'aiguille, et que par conséquent la déviation augmentera avec leur nombre, c'est-à-dire avec la quantité des tours de spire qui composent l'hélice totale. Cela arrive en effet si l'on prend la précaution de couvrir le fil métallique avec de la soie ou du coton pour empêcher la transmission de l'une à l'autre spire, et obliger le courant à parcourir toute la longueur du circuit ; car à chaque nouvelle circonvolution on voit l'aiguille s'écarter davantage de sa position primitive.

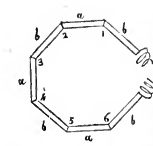
Ces aiguilles magnétiques, environnées ainsi à plusieurs reprises par le fil métallique qui réunit les deux extrémités de l'électromoteur, s'appellent des *galvanomètres*, ou *rhéomètres*, *multiplicateurs*, dénominations parfaitement justes, puisqu'on est convenu de donner le nom de *galvanomètre* ou *rhéomètre* simple à une aiguille aimantée qui dévie sous l'action d'un courant électrique quelconque.

Il est très-important de remarquer que, pour la classe particulière de courants dont nous nous occupons actuellement, la *multiplication* de la force électro-magnétique par l'accroissement des tours de spire se vérifie exactement, comme en toute autre espèce de courant électrique, lorsqu'on n'altère pas le fil qui joint ensemble les deux extrémités de l'électromoteur; mais qu'elle peut manquer, et même se convertir en véritable *soustraction*, lorsque ce fil est remplacé par un autre plus long ou plus mince. Nous pas-

serons sous silence le dernier cas, qui ne nous fournirait aucune lumière sur l'application des courants thermo-électriques à la mesure des faibles degrés de chaleur, seul objet que nous ayons maintenant en vue; et nous considérerons uniquement le cas de l'augmentation de longueur dans le fil conjonctif, qui sera toujours supposé avoir le même diamètre.

L'expérience prouve qu'en prenant des fils de plus en plus étendus pour joindre ensemble les extrémités libres des deux barreaux d'antimoine, l'intensité de la force déviatrice n'augmente avec le nombre des tours de spire que jusqu'à une certaine limite; après quoi elle commence à décroître, en sorte que la déviation de l'aiguille finirait par devenir tout à fait nulle si le fil était suffisamment prolongé.

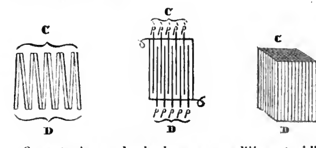
La raison de ce fait est facile à concevoir lorsque l'on considère que le courant thermo-électrique rencontre dans les conducteurs les plus parfaits en apparence une certaine résistance, qui doit nécessairement augmenter avec l'étendue de l'espace décrit. Tant que le surcroît de résistance éprouvé par l'électricité, en parcourant l'excédant du nouveau fil sur le précédent, est inférieur à la quantité d'action que l'on gagne en roulant cet excédant autour de l'aiguille, il y a augmentation de force *déviatrice*. Après quoi la diminution commence, parce que l'obstacle opposé par l'adjonction du fil est plus grand que l'action déviatrice résultant des nouvelles circonvolutions.



Cependant l'expérience démontre que la force électromotrice devient plus intense en ajoutant à l'appareil de nouvelles alternatives de bismuth et d'antimoine, disposition qui est représentée par la figure ci-contre, dans laquelle les barreaux d'antimoine sont désignés par *a* et ceux de bismuth par *b*. Car, si l'on chauffe les soudures alternes de cette suite de barreaux, c'est-à-dire les soudures représentées par l'une des deux séries des nombres pairs ou impairs, en laissant l'autre à l'état naturel, et si l'on fait communiquer les deux derniers barreaux avec les extrémités de ce même fil de cuivre roulé en hélice, qui naguère n'exerçait plus qu'une action affaiblie en raison de sa trop grande longueur, on voit la déviation de l'aiguille s'accroître sensiblement. Mais il arrive bientôt une réaction analogue à celle que nous avions observée précédemment, en variant la longueur du fil conjonctif roulé en hélice autour de l'aiguille. L'augmentation du courant avec le nombre des barreaux ajoutés, ou pour mieux dire avec le nombre de leurs alternatives, a lieu jusqu'à une certaine limite; après quoi l'adjonction de nouveaux barreaux ne produit plus aucun effet appréciable; comme s'il arrivait une espèce de compensation entre le surcroît de force résultant des nouvelles alternatives, et le surcroît de résistance que les barreaux intercalés apportent au mouvement de l'électricité. La résistance étant en raison directe de la longueur des barreaux, il est clair que plus les barreaux seront courts, plus la limite sera reculée et plus l'efficacité de l'appareil sera augmentée.

Si l'on prend un fil de plus grande longueur, il faut nécessairement ajouter un plus grand nombre de barreaux pour arriver au *maximum* d'effet.

Ces expériences se font d'une manière beaucoup plus commode en réunissant les barreaux de bismuth et d'antimoine sous des angles très-aigus, de manière à former une espèce de zigzag.



On peut même souder les barreaux parallèlement, si l'on intercale entre eux des bandelettes de papier verni p′, p, p′, p, etc. qui suffisent pour empêcher la transmission latérale du courant thermo-électrique et le forcent à parcourir toute la longueur de la chaine métallique, comme dans le cas où les barreaux sont disposés sous forme de polygone.

On peut enfin distribuer les barreaux en faisceau, au moyen de plusieurs rangs disposés parallèlement et alternativement, de manière que l'un termine par le bismuth et l'autre par l'antimoine, puisqu'en soudant ensemble les extrémités libres adjacentes il est toujours possible de conserver l'ordre des contacts alternatifs, et de former ainsi une seule rangée repliée sur elle-même. Pour mettre en activité ces appareils, auxquels on donne le nom de *piles thermo-électriques*, il suffit d'appliquer la chaleur à l'une des extrémités C, D, contenant les soudures pair ou impair, et

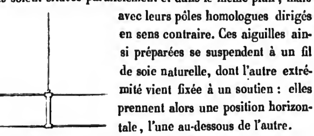
constituant ce que l'on est convenu d'appeller les deux *faces* de la pile.

Revenons maintenant au fil de cuivre roulé en hélice et à l'aiguille aimantée qui se trouve librement suspendue à sa partie centrale. Il ne faut pas oublier le but auquel nous tendons, savoir: d'augmenter, autant que possible, l'action exercée sur cette aiguille mobile par les courants électriques circulant dans l'hélice environnante. Nous venons de voir qu'on obtient une augmentation considérable par le moyen d'une pile thermo-électrique à éléments très-courts, et d'une certaine longueur de fil conjonctif roulé en hélice autour de l'aiguille aimantée.

Mais comme l'action du courant devient d'autant plus énergique que le fil passe plus près de l'aiguille, il est évident que pour avoir le *maximum* d'effet il faudra placer l'aiguille très près des circonvolutions du fil; ou, en d'autres termes, il est évident qu'il faudra construire l'hélice aussi surbaissée que possible. Cependant si l'on entoure l'aiguille de trop près, les circonvolutions supérieures viendront masquer le cercle gradué et empêcher de lire les indications de l'instrument. D'autre part, on aura beau augmenter par la proximité des spires la force déviatrice du courant, on se trouvera toujours en présence d'un formidable adversaire, savoir, de l'action du globe terrestre qui agit en sens opposé au courant électrique et tend à ramener l'aiguille dans le plan du méridien magnétique avec une énergie d'autant plus grande que l'aiguille s'écarte davantage de ce plan.

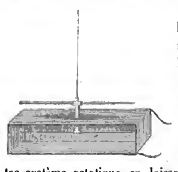
On parvient à neutraliser l'action de la terre, et à rendre en même temps les indications de l'appareil parfaitement visibles, en réunissant ensemble, par un double fil métallique tordu et fort mince, ou par tout autre artifice, deux aiguilles

aimantées égales autant que possible, de manière à ce qu'elles soient situées parallèlement et dans le même plan, mais avec leurs pôles homologues dirigés en sens contraire. Ces aiguilles ainsi préparées se suspendent à un fil de soie naturelle, dont l'autre extrémité vient fixée à un soutien : elles prennent alors une position horizontale, l'une au-dessous de l'autre.



Il est évident que si les deux aiguilles étaient parfaitement égales en force magnétique, elles formeraient un véritable *système astatique*, c'est-à-dire un système qui serait *sans position d'équilibre*, parce que l'action du globe terrestre n'exercerait sur lui aucune influence; car les aiguilles étant placées hors du méridien magnétique, et l'une d'elles tendant à tourner de gauche à droite, par exemple, afin de rentrer dans ce plan, l'autre tendra évidemment à se porter de droite à gauche avec la même énergie, et le système soumis à l'action simultanée de ces deux forces égales et contraires restera en équilibre dans le plan où elles se trouvent déviées. Mais quelque soin que l'on prenne, on ne parvient jamais à cette égalité parfaite de l'aimantation des deux aiguilles. Leur ensemble se dirige donc encore en vertu de la différence des deux forces magnétiques opposées, mais avec une intensité infiniment moindre que dans l'état d'isolement. En ôtant avec délicatesse l'excès de magnétisme de l'aiguille prépondérante par le contact ou par le simple rapprochement d'un des pôles homologues d'une petite aiguille aimantée, on peut aisément parvenir à rendre cette intensité trois ou quatre mille fois moindre que celle des aiguilles simples, et obtenir ainsi des systèmes astatiques trois ou quatre mille

fois plus sensibles à l'action des forces qui tendent à les faire sortir de leur position d'équilibre.



Supposons maintenant que l'on écarte les fils qui forment la partie supérieure de l'hélice, et qu'après avoir ménagé une espèce de fente mitoyenne en les divisant en deux masses égales, on introduise par cette ouverture l'aiguille inférieure de notre système astatique en laissant l'autre en dehors. Il est clair que les déviations de l'aiguille intérieure se rendront parfaitement lisibles par le mouvement de sa compagne extérieure, et que les lectures seront tout-à-fait exemptes de l'erreur de parallaxe, erreur que l'on ne saurait éviter dans le multiplicateur à une seule aiguille. Dans cette disposition, le système, soustrait comme nous venons de le dire à la plus grande partie de la force directrice de la terre, aura donc en même temps l'avantage cherché de conduire à une observation facile et précise des déviations dues à l'action du courant.

Cependant on pourrait poser la question suivante: nous convenons que l'aiguille extérieure soustrait l'aiguille centrale à l'action du globe terrestre et rend celle-ci extrêmement sensible à la force déviatrice du courant qui circule dans l'hélice; mais comme elle est aimantée, et par cela même soumise à l'influence du courant électrique, ne serait-il pas possible qu'elle éprouvât une tendance à se mouvoir en sens contraire, de telle sorte que l'avantage de neutraliser la puissance magnétique de la terre sur l'aiguille du dedans

fût compensé, ou du moins diminué, par une action opposée à celle qui agit sur l'aiguille du dehors? Non, cela ne saurait avoir lieu, puisque la résultante des forces déviatrices, qui opèrent sur l'aiguille extérieure, loin de s'opposer à la déviation de l'aiguille centrale, tend au contraire à faire tourner le système dans le même sens. On pourrait le démontrer moyennant l'examen successif des actions rotatoires de chacune des quatre parties principales de l'hélice, mais on y parvient plus aisément par les observations suivantes: d'abord si l'on approche l'hélice parcourue par le fluide électrique au-dessous d'une aiguille aimantée, seule et librement suspendue, il y a déviation dans le sens exigé par l'action du courant supérieur; pour savoir si l'aiguille externe contrarie ou ne contrarie pas la rotation de l'aiguille interne on peut donc faire abstraction des parties latérales et de la partie inférieure de l'hélice, et avoir égard à la seule partie supérieure. Or, le courant qui circule dans les portions supérieures des spires passant au-dessus d'une aiguille du système et au-dessous de l'autre, doit les faire dévier toutes les deux dans le même sens à cause des positions renversées de leurs pôles respectifs; c'est-à-dire, que la résultante des forces qui s'exercent sur l'aiguille externe viendra ajouter son effort à celui du courant supérieur sur l'aiguille interne, et par suite aux efforts conspirants des courants latéraux et inférieurs.

Les systèmes astatiques très-sensibles appliqués comme nous venons de l'indiquer aux hélices d'un fil ordinaire de cuivre ou d'argent présentent presque toujours le fait curieux de ne pouvoir s'arrêter au zéro du cadran; c'est-à-dire que, généralement, les systèmes astatiques doués d'une grande sensibilité ne peuvent s'arrêter dans le plan vertical qui divise

l'hélice en deux portions égales, parallèlement à la direction des spires. Lorsqu'on cherche à les amener dans ce plan, en tournant doucement l'hélice vers leur position d'équilibre, on les voit s'écarter aussitôt, à droite ou à gauche, et après quelques oscillations se fixer stablement dans une position d'équilibre plus ou moins éloignée du zéro. On mesure aisément cet arc de déviation moyennant un cercle gradué que l'on fixe à la partie supérieure de l'hélice après y avoir pratiqué une ouverture longitudinale dans le sens du zéro et de la division des spires. La déviation est égale des deux côtés; elle peut aller jusqu'à 10 ou 12 degrés et même davantage, si en opérant sur un système astatique d'une grande perfection, *on donne une certaine largeur à la fente qui sert à introduire dans l'hélice l'aiguille inférieure du système.* Le phénomène dérive donc du partage supérieur du fil en deux masses égales, qui ont chacune un centre d'attraction vers lequel tendent les pôles des aiguilles aimantées. Ainsi le cuivre, dont ces fils sont ordinairement composés, tout en n'étant pas un métal magnétique par lui-même, opère sur les aiguilles aimantées comme s'il contenait des parcelles de fer. C'est en effet le cas du cuivre de commerce; et l'on en devine facilement le motif, lorsqu'on réfléchit à l'imperfection des procédés de raffinage et au contact des outils employés dans les transformations successives du cuivre en rosettes, en verges et en fils. Et il ne faut pas s'imaginer que le fil ordinaire d'argent soit en de meilleures conditions; car l'argent, qui se trouve presque toujours en présence du fer pendant les opérations nécessaires à son extraction, ne se convertit en fil qu'à l'aide du marteau et des filières d'acier.

Cependant lorsqu'on se procure de l'argent ou du cuivre

bien épurés par les meilleurs procédés chimiques, lorsqu'on les fait fondre dans des moules de terre, et passer par des filières d'agathe, loin de tout contact avec le fer et les substances ferrugineuses, on obtient des fils de cuivre et d'argent qui n'ont aucune action appréciable sur le système astatique le plus sensible, et qui lui permettent de se tenir exactement sur le zéro du cercle gradué.

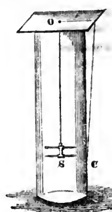
On comprend que ces observations doivent se faire au travers d'une cloche de verre, qui maintienne en repos l'air atmosphérique autour de l'hélice et du système astatique; car, sans cette précaution, la force qui tend à diriger les aiguilles étant extrêmement faible, celles-ci ne pourraient prendre aucune position d'équilibre stable et changeraient de place à la moindre agitation de l'air ambiant.

La faiblesse de la force directrice produit encore la conséquence, assez singulière au premier abord, de ne point permettre que les systèmes astatiques se fixent dans la direction de l'aiguille aimantée. Effectivement, la position d'équilibre de ces systèmes abandonnés à eux-mêmes est, en général, d'autant plus divergente du méridien magnétique, que le couple d'aiguilles se trouve avoir une compensation plus parfaite; je dis en général, parce qu'il arrive aussi quelquefois que des systèmes astatiques d'une grande sensibilité se tiennent à très peu de chose près sur le méridien magnétique; cependant, lorsque le mode de suspension leur laisse une mobilité suffisante, jamais on n'observe le cas opposé, savoir: la position hors du méridien avec peu de sensibilité. Ainsi *la perfection des systèmes astatiques est une condition indispensable à l'apparition du phénomène*. En effet, quoique la rotation des aiguilles aimantées semble parfaitement libre, elle éprouve cependant

une certaine résistance, qui étant très-légère, ne peut se montrer et agir d'une manière efficace que dans le cas où la force directrice est elle-même d'une grande faiblesse.

Mais pour bien comprendre cette lutte entre la force et la résistance il nous faut d'abord examiner la nature et les qualités du fil qui supporte les aiguilles. J'ai dit ci-dessus qu'il était de soie naturelle, c'est-à-dire, sans aucune préparation, et telle que le fournit le cocon. Cependant la duplicité de l'organe sérifère, et le simple collage par une substance gommeuse, moyennant laquelle le vers à soie réunit les sécrétions des deux organes à mesure qu'elles sortent de son corps, permettent de dédoubler ce fil déjà si fin. A cet effet on commence par ôter la bourre qui environne le cocon, on déroule quelques décimètres du premier fil soulevé qui se présente, on le coupe, et l'on fixe à l'une de ses extrémités une petite boule de cire molle pour le maintenir tendu, et lui enlever en même temps ses principaux plis. On tourmente ensuite et on tord en divers sens l'autre extrémité pour défaire l'union des deux fils et les exciter à la séparation, qui ne tarde pas à s'opérer. Alors on saisit les deux bouts et on les écarte tout doucement, après avoir tenu le fil pendant quelques instants plongé dans une faible dissolution de potasse, afin de dissoudre une partio de la substance gommeuse qui réunit ses deux moitiés longitudinales ; celles-ci cèdent enfin, et donnent, en se divisant, les fils dont on doit faire usage dans la suspension des systèmes astatiques doués d'une grande sensibilité, comme ceux employés dans la construction du thermomultiplicateur. A voir l'exiguité de ces fils, qui abandonnés à eux-mêmes voltigent et s'élèvent en serpentant dans l'air le plus calme, on les dirait tout à fait privés d'élasticité; et cependant cette force y existe, elle

produit même des effets très-sensibles. Voici l'expérience qui le démontre.



Imaginons un excellent système astatique S suspendu, dans l'intérieur d'un manchon de verre, à l'un de ces fils de soie dédoublés et dégommés ; imaginons le fil passant par l'ouverture centrale O d'un couvercle d'ivoire à bords parfaitement polis, et attaché moyennant une petite boule de cire C à la paroi extérieure de l'appareil. Il est clair qu'en laissant couler à travers l'ouverture O une longueur plus ou moins grande de fil dans l'intérieur du manchon, et en faisant remonter ainsi successivement le point d'adhérence extérieure, on pourra faire varier à volonté la distance entre les aiguilles et le disque. Supposons d'abord cette distance de trois pouces. En de semblables circonstances *d'astaticité* du système et de longueur dans le fil de suspension, il se manifeste presque toujours, comme je le disais tantôt, une divergence considérable entre le plan vertical d'équilibre et le méridien magnétique; on tourne doucement le cylindre de verre jusqu'à ce que les aiguilles deviennent à peu près perpendiculaires à ce dernier plan. Cela posé, on fait descendre successivement le système à 6, 9, 12 pouces, et l'on marque à chaque fois sur le soutien fixe de l'appareil la trace du nouveau plan d'équilibre où les aiguilles s'arrêtent. L'opération finie, on compare entre elles les traces correspondantes aux diverses stations, et l'on voit que le système des deux aiguilles aimantées s'est d'autant plus écarté de la position initiale et

rapproché du méridien magnétique que la longueur du fil était en réalité plus grande.

Cette expérience n'a pas besoin de commentaires ; elle nous dévoile en même temps, et la cause cherchée de la direction anomale que prennent ordinairement les systèmes astatiques très-sensibles, et le moyen d'y rémédier. La cause, c'est la résistance ou pour mieux dire *la force de torsion du fil de soie;* le remède, *l'allongement de ce fil.* Nous remarquerons toutefois qu'une longueur excessive du fil de suspension est plus incommode qu'utile : car peu importe, au bout du compte, d'obtenir l'équilibre par le seul effet des forces magnétiques, ou par une combinaison de ces forces avec la torsion du fil de suspension, pourvu que cette dernière soit réduite à un état de faiblesse égal ou inférieur à l'effet produit par le *magnétisme libre* des deux aiguilles, c'est-à-dire, égal ou inférieur à la tendance du système des deux aiguilles vers le méridien magnétique. Aussi se contente-t-on de donner une longueur de 15 à 16 centimètres aux fils de suspension, qui conservent encore sous de telles dimensions une force de torsion appréciable par les seuls systèmes astatiques d'une grande délicatesse.

Or, ici comme dans le cas de toute autre substance organique filiforme, cette force varie avec l'humidité du milieu ambiant. Les systèmes astatiques, fort sensibles, suspendus à un fil de soie et abandonnés à eux-mêmes tendront donc à altérer leurs positions d'équilibre par l'effet d'un changement survenu dans l'état hygrométrique de l'atmosphère ; et c'est aussi ce que l'on observe. De plus, comme l'humidité diminue ordinairement pendant le jour à mesure que le soleil s'élève sur l'horizon, et reprend pendant la nuit sa valeur primitive, les positions d'équilibre successivement af-

fectées par le système astatique suivront la même période oscillatoire.

Hâtons-nous d'ajouter que des oscillations analogues pourraient aussi être engendrées dans ces sortes de systèmes par l'action inégale de la chaleur sur les deux aiguilles qui les composent. En effet nous avons vu que leur position d'équilibre hors du méridien magnétique résulte de la combinaison des actions dues au magnétisme libre et à la torsion du fil. Or, comme l'intensité magnétique augmente lorsque la température diminue et vice versâ, il est clair que si, par une différence de trempe ou de qualité, l'une des deux aiguilles était affectée plus puissamment que l'autre sous l'action de la chaleur, la quantité de magnétisme libre changerait, et avec elle, la position d'équilibre du système. Quant à la forme oscillatoire de ces changements, elle proviendrait, comme dans le cas de l'humidité, de la variation périodique qu'éprouve la température de l'atmosphère par les vicissitudes du jour et de la nuit.

Telles sont, à mon avis, les causes des oscillations que subit le plan d'équilibre des systèmes astatiques fort sensibles. La variation diurne de la déclinaison, à laquelle certains observateurs ont cherché de rattacher le phénomène, me paraît n'y exercer absolument aucune influence (2).

(2) Cette variation a une valeur moyenne de 10 à 12 secondes. L'angle diurne parcouru par les systèmes astatiques est de 5 à 6 degrés et même de 8 à 10 degrés pour une haute sensibilité dans ces sortes de combinaisons magnétiques. Selon les observations que nous venons de citer, il faudrait donc que la combinaison des deux aiguilles aimantées, suspendues en sens contraire sur un même support, rendît *les variations diurnes* 35 à 40 fois plus sensibles. Il faudrait en outre que *les perturbations* s'y montrassent agrandies dans le même rapport. Cependant MM. Bravais, Lottin, et Martins, établis en Islande

Ces recherches sur la nature des variations éprouvées par le plan d'équilibre des deux aiguilles sont d'ailleurs d'un intérêt secondaire ; mais il importe beaucoup de faire remarquer que de telles variations n'apportent aucun trouble dans les mesures comparatives des courants thermo-électriques qui parcourent les spires de l'hélice. Premièrement, parce que le mouvement oscillatoire est très-lent et qu'il reste tout le temps désirable pour *vérifier le zéro* avant et après chaque série d'observations. En second lieu, parce que les changements de direction, éprouvés par la résultante des forces qui maintiennent le système astatique en équilibre, ne produisent aucune altération sensible dans l'intensité des composantes ; en d'autres termes, parce que ces changements n'ont aucune influence appréciable sur la sensibilité de l'appareil : et cela se prouve avec la dernière évidence par la constance de l'angle de déviation que le même courant thermo-électrique, introduit dans l'hélice, imprime au système des deux aiguilles à une époque quelconque de la journée.

La constance de sensibilité dans les systèmes à deux aiguilles peut se maintenir beaucoup plus facilement qu'on ne pourrait le supposer d'abord. J'ai vu les systèmes astatiques de quelques-uns de mes galvanomètres la conserver intacte pendant huit à dix ans, et donner encore aujour-

pendant sept mois consécutifs avec une bonne collection de déclinatoires et de multiplicateurs à deux aiguilles, font mention d'effets très-marqués produits sur l'aiguille de déclinaison par un grand nombre d'aurores boréales ; mais ils gardent un silence absolu relativement aux multiplicateurs, ce qui porte à croire que ces instruments ne leur ont fourni aucun résultat digne d'intérêt, et que par conséquent la prétendue exaltation des variations magnétiques dans les systèmes à deux aiguilles n'existe point.

d'hui, sous l'action d'un courant thermo-électrique connu, les mêmes déviations qu'ils affectaient les premiers jours de leur construction.

Il est clair que pour obtenir cet état invariable de sensibilité il faut préserver les aiguilles de la rouille, des fortes secousses, des actions électro-magnétiques trop violentes, et du voisinage des aimants et du fer; car toutes ces causes peuvent produire une altération d'équilibre magnétique.

Ces précautions n'exigent pas toutefois un degré de rigueur extrême, surtout à l'égard du voisinage des masses de fer ou d'acier aimanté; car les deux aiguilles éprouvent toujours de la part des forces magnétiques extérieures des influences contraires par suite de leurs positions renversées. C'est même à cette opposition des pôles que le système astatique doit en partie la conservation de son énergie magnétique.

Cependant la petite portion de magnétisme qui reste libre dans le couple suspendu peut être temporairement modifiée par des forces magnétiques externes, de manière à rendre l'instrument plus ou moins sensible, pour lui laisser reprendre le degré de sensibilité primitive, lorsqu'on le soustrait de nouveau à l'action de ces forces. Ce but peut être atteint de plusieurs manières; je vais indiquer celle qui me semble la plus simple.

Imaginons, assez loin de l'appareil de suspension, un barreau aimanté situé horizontalement dans le plan d'équilibre du système astatique, et précisément, sur la direction prolongée de la ligne conduite par le point de milieu de la petite barre métallique où les deux aiguilles sont implantées. Si le système était parfaitement astatique, il est clair que le pôle le plus rapproché du barreau n'exercerait sur lui au-

cune influence. Mais comme le magnétisme d'une des aiguilles est un peu plus fort que le magnétisme de l'autre, il y aura nécessairement attraction ou répulsion: dans le premier cas la force directrice du système sera augmentée, dans le second elle sera diminuée.

Lorsque les aiguilles s'écarteront du zéro, l'action du barreau variera, puisqu'il y aura éloignement du couple des pôles antérieurs et rapprochement du couple postérieur. Mais en considérant qu'on ne dépasse pas dans l'usage de l'instrument des arcs de 30 degrés, par des motifs que nous verrons plus tard, et que le barreau est fixé à une distance considérable, on conçoit que, pour toute l'étendue de cet arc, la modification de sensibilité apportée dans le système mobile par la présence du barreau se maintiendra à peu près constante. Or la distance, à laquelle ce système commence à ressentir l'influence du barreau fixe, dépend évidemment de sa perfection. Donc les galvanomètres les plus sensibles seront aussi les plus aptes à supporter la modification que je viens de décrire.

Il est extrêmement facile de mettre la justesse de ces inductions tout à fait hors de doute au moyen de l'expérience: car ayant disposé les choses de manière à diminuer la tendance du système astatique vers sa position naturelle d'équilibre, les aiguilles prennent sous l'action du même courant électrique des déviations beaucoup plus grandes qu'auparavant; et l'on voit l'effet produit augmenter avec la sensibilité de l'instrument. C'est ainsi que dans les cas où il fallait le concours d'un appareil thermoscopique d'une délicatesse extrême, j'ai pu agrandir de 15 à 20 fois la petite fraction de degré que les systèmes astatiques de mes rhéomètres multiplicateurs décrivaient sous l'action déviatrice d'une for-

ce calorifique extrêmement faible. Il est inutile d'ajouter que l'instrument reprend son allure habituelle lorsqu'on le soustrait à l' action du barreau extérieur.

Nous ne nous arrêterons pas au cas opposé, dans lequel la force directrice augmente et la sensibilité du système astatique diminue; d'abord, parce que l'action attractive du barreau sur les aiguilles se conçoit aisément; ensuite, parce que l'on n'a jamais besoin de l'appliquer, car on verra bientôt qu'il existe un autre moyen de modérer la sensibilité des galvanomètres, moyen bien préférable, sous tous les rapports, à l'emploi du barreau magnétique.

Ces principes posés, il nous sera extrêmement facile de comprendre les détails de construction, la théorie et l'usage des thermomultiplicateurs , ou thermactinomètres électromagnétiques.

§. 4.

Des thermomultiplicateurs.

Chaque thermomultiplicateur se compose d'une pile, d'un galvanomètre, et des tubes qui servent à établir les communications entre ces deux parties de l'appareil.

Les lois énoncées des courants thermo-électriques s'observent sur des barreaux et des fils de toutes dimensions; voilà pourquoi dans leur exposition je n'ai fait aucune mention des grosseurs ou des sections transversales des pièces employées. Maintenant cette donnée devient un élément que l'on ne saurait plus négliger. En effet , comme il s'agit de découvrir et d'apprécier des radiations calorifiques excessivement faibles, comme les mesures à prendre sont souvent

très-nombreuses, il faut de toute nécessité augmenter autant que possible la promptitude et l'intensité de l'échauffement de la face active de l'électromoteur, c'est-à-dire qu'il faut employer des barreaux très-minces. Cette petitesse dans la section transversale est d'autant plus nécessaire qu'on a souvent occasion d'explorer des faisceaux très-déliés de chaleur. De là une autre condition à remplir, savoir: l'emploi de piles à faces peu étendues et par conséquent composées d'un nombre assez restreint de barreaux; vingt-cinq à trente de ces barreaux en bismuth, et autant en antimoine, ayant un millimètre d'épaisseur, deux millimètres de largeur et vingt millimètres de longueur, satisfont assez bien aux deux conditions que je viens d'indiquer (3).

(3) Telles sont les plus petites dimensions des barreaux de bismuth et d'antimoine que les fondeurs et les ouvriers chargés des soudures de mon appareil thermoscopique ont adoptées. Cependant j'ai toujours insisté, et j'insiste encore, pour qu'on tâche de les réduire davantage, étant intimement convaincu que l'instrument en recevrait une amélioration considérable. Mais ne pourrait-il pas se faire, dira-t-on, qu'une partie de la chaleur absorbée par la face antérieure d'une pile à barreaux plus courts que ceux employés actuellement les parcourût dans toute leur longueur et parvint ainsi jusqu'à l'autre face, de manière que la force du courant thermo-électrique en fût sensiblement diminuée?

Pour montrer qu'il n'y rien à craindre sous ce rapport, *lors même que l'on conserverait aux barreaux de bismuth et d'antimoine leur section actuelle*, il suffit de couper transversalement en deux parties égales quelques-uns de ces couples, et d'en former une petite pile. On abritera ensuite l'appareil ainsi réduit en longueur par des écrans; on le mettra en communication avec le galvanomètre; et l'on fera en sorte que l'une de ces faces reste longtemps exposée à un rayonnement calorifique constant, produisant le maximum de la déviation usitée. S'il est vrai que la différence de température entre les deux faces de la pile diminue par suite de la chaleur ab-

On réunit les éléments, les couples, et les rangées comme nous l'avons vu ci-dessus (pág. 27), et l'on en forme un faisceau prismatique dont la section ronde ou carrée soit d'environ un centimètre. On fixe avec du mastic le milieu

serbée à la face antérieure et transmise d'un bout à l'autre de chaque barreau, l'index du galvanomètre, après avoir conservé pendant quelque temps la position angulaire de 30 degrés devra nécessairement se rapprocher de zéro.

Mais si l'on fait l'expérience en trouve que la déviation galvanométrique due à ces piles raccourcies, se maintient intacte pendant des heures entières. Donc le doute formulé ci-dessus n'a aucune valeur.

En voyant un courant électrique engendré par la chaleur, et celle-ci dissipée à quelques millimètres de distance de la surface échauffée, on est naturellement porté à croire que l'un des agents se transforme dans l'autre et que l'échauffement disparaît parce que la chaleur devient de l'électricité. Mais l'expérience directe n'appuie nullement une semblable manière de voir: car *la propagation de la chaleur dans un couple thermo-électrique s'accomplit exactement de la même manière, lorsque le courant est établi, ou lorsqu'il n'y a aucune trace appréciable d'électricité dynamique.*

En effet, supposons deux cylindres de bismuth, d'un centimètre de rayon et d'un décimètre de longueur, plus quatre vases de cuivre d'un quart de litre environ de capacité. Imaginons un vase soudé par le milieu d'une des parois latérales à chaque extrémité des barreaux. On aura ainsi deux systèmes parfaitement semblables composés d'un barreau de bismuth en contact avec deux vases de cuivre. Maintenant si on fond des quatre récipients en sonde quatre gros bouts de fil de cuivre de deux millimètres de diamètre et d'un décimètre de longueur, il est clair qu'en donnant aux vases en contact avec les deux extrémités de chaque barreau des températures différentes, on obtiendra des circuits thermo-électriques complets ou interrompus, selon que les extrémités des fils appartenant à chaque couple de vases seront jointes ensemble ou séparées. Supposons un des systèmes ouvert, l'autre fermé.

Pour examiner la marche de la chaleur dans l'intérieur des bar-

de ce faisceau à la surface interne d'une petite zone transversale en cuivre jaune de même forme, et un peu plus courte, de manière à laisser les deux faces de la pile entièrement libres. Deux parties opposées de la zone man-

reaux, on y introduira, à égale distance des deux extrémités, le réservoir d'un petit thermomètre fort sensible, moyennant une ouverture qui aboutisse à sa partie centrale; puis l'on mettra simultanément dans l'un des vases adhérents à chaque barreau de la glace fondante, dans l'autre de l'eau chaude que l'on maintiendra, si l'on veut, en ébullition avec le secours de deux petites lampes à alcool placées sous les récipients.

Alors on verra les thermomètres commencer ensemble leur mouvement ascentionnel et marcher constamment d'accord. Si l'on trouve quelques différences, elles tiendront à la diverse sensibilité des thermomètres, ou à une disparité de structure dans les deux appareils; ce que l'on prouvera avec la plus grande facilité, en mettant l'un des instruments à la place de l'autre, ou en ouvrant le circuit fermé et en fermant le circuit ouvert; car l'excès qui avait lieu dans le barreau à circuit ouvert, par exemple, se montrera après l'échange des thermomètres ou du contact des fils dans le barreau à circuit fermé, et vice versâ.

Ainsi la chaleur absorbée par la surface antérieure, après avoir traversé la lame de cuivre, excite dans le circuit fermé le courant électrique, et laisse cet agent en repos dans le circuit où la communication est interrompue; mais la propagation calorifique se fait, pour l'un et l'autre barreau, dans le même temps et avec la même intensité.

Concluons que si la chaleur se perd à une petite distance de la face antérieure des piles du thermomultiplicateur, cela dérive de la faible élévation de température employée dans l'usage de cet instrument, et de la mauvaise conductibilité des couples bismuth et antimoine, qui, réunie à la petitesse de leur section transversale, retarde la propagation calorifique, et rend bientôt la quantité de chaleur latéralement transmise par rayonnement ou par contact, égale à la quantité de chaleur absorbée sous l'action de la radiation incidente.

quent et sont remplacées par des plaques d'ivoire un peu plus étroites, au travers desquelles sortent deux petites colonnes de cuivre communiquant aux extrémités de la pile et destinées à l'attache des fils qui servent à établir le contact métallique entre ces extrémités et celles du galvanomètre. Les faces de la pile sont noircies et mises à l'abri des rayonnement latéraux par deux tubes en cuivre de quatre à cinq centimètres de longueur, qui doivent être munis de couvercles mobiles, et s'adapter aux deux bouts de la zone transversale; celle-ci porte enfin une vis qui sert à fixer l'appareil sur un pied à tiroir et à charnière, au moyen duquel on peut arrêter la pile à diverses hauteurs et sous toutes sortes d'inclinaisons. Ces différentes dispositions sont représentées dans la figure 6, où les tubes T, T′ sont séparés de la pile P afin de montrer la disposition intérieure de l'appareil.

Nous venons de dire que les faces ou parties découvertes de la pile sont enduites de noir de fumée ; cette substance n'est plus appliquée ici pour empêcher le passage immédiat de certains rayons à travers le corps thermoscopique comme dans le cas des thermactinomètres de dilatation, mais seulement pour augmenter l'absorption des surfaces métalliques destinées à recevoir la première impression de chaleur. Le noir de fumée, appliqué sur toutes sortes d'appareils destinés à la mesure de la chaleur rayonnante, procure aussi au corps thermoscopique un autre avantage très-remarquable, dont il sera question lorsque nous parlerons des diverses espèces de rayons calorifiques.

Dans certaines recherches il est nécessaire d'avoir des thermactinomètres qui recueillent la chaleur distribuée sur une ligne donnée. Alors on emploie une seule rangée d'éléments thermo-électriques, que l'on renferme dans un étui

muni d'une fente susceptible d'être plus ou moins retrécie, et que l'on monte d'ailleurs d'une manière tout-à-fait analogue aux éléments de la pile précédente.

On appelle *thermomultiplicateurs à faisceau* ceux qui portent la première pile, et *thermomultiplicateurs linéaires* ceux qui sont munis de la seconde.

Toutes les propriétés actuellement connues de la chaleur rayonnante peuvent être étudiées avec le plus grand succès au moyen de ces deux appareils. On a bien proposé d'autres formes de piles ; ainsi les éléments de chaque couple bismuth-antimoine ont été soudés sous un angle de quelques degrés, et la soudure réduite en pointe très-aigue; les couples ont été ensuite distribués symétriquement, comme autant de rayons d'un cercle, les pointes étant tout près du centre et les communications établies, entre les deux métaux différents des couples successifs, par de petites barres de bismuth ou d'antimoine soudées aux extrémités rapprochées de la circonférence. On renfermait ensuite le tout en une boîte rondo percée à son centre d'uno petite ouverture dans laquelle on faisait pénétrer successivement les diverses radiations calorifiques qu'il s'agissait d'étudier. Mais ces sortes de piles, et toutes celles dont les deux faces no sont pas égales, ne peuvent être employées à des recherches comparatives, dans lesquelles elles introduisent une grando incertitude à cause de l'action diverse que la chaleur exerce sur leurs extrémités opposées; ce qui prive les thermactinomètres électro-magnétiques d'une do leurs plus belles prérogatives, de l'insensibilité aux variations do température du milieu ambiant. En effet, lorsque les deux faces de la pile sont égales, elles suivent en même temps ces variations, aucun développement d'électricité n'a lieu, et l'indicateur de l'in-

strument se maintient au zéro de l'échelle. Mais si la pile est à faces inégales par la forme, la masse, ou la distribution des extrémités des couples dont elle se compose, alors les changements qui arrivent dans la température de l'air pendant les expériences affectent plus vite la face plus légère ou plus aérée, et l'instrument donne, *par cela seul*, des indications anomales qui viennent troubler les mesures des rayons calorifiques soumis aux expériences.

Il faut donc rejeter tout ce qui tend à altérer l'égalité des extrémités opposées des piles thermo-électriques, et maintenir soigneusement au thermomultiplicateur la qualité de *thermactinomètre compensé*, qui est pour ainsi dire inhérente à sa nature, et extrêmement difficile à obtenir dans les thermactinomètres de dilatation.

Le galvanomètre que l'on met en communication avec ces piles est multiplicateur, à système astatique, et entièrement construit d'après les principes exposés tantôt. On en voit une représentation en perspective dans la figure 7. CD est une base circulaire en métal munie de trois vis A, A', A'', destinées à placer le fil de suspension dans l'axe de l'instrument; sur cette base s'élèvent deux tringles L, L', réunies à la partie supérieure par la traverse recourbée I, I'. Le fil de cocon, dégommé et dédoublé, qui porte le système astatique est soutenu au centre de cette traverse par un mécanisme au moyen duquel on peut le faire monter ou descendre d'une certaine quantité sans lui communiquer aucune torsion: ce mécanisme se met en activité en tournant le bouton P.

Les aiguilles aimantées et le fil qui les soutient sont garantis de l'agitation de l'air par une cloche ou cylindre de verre RS, qui entre dans une rainure de la base CD, et se

termine par une lame de la même substance percée au centre pour livrer passage au bouton P.

Le fil de cuivre couvert de soie *qui a été trouvé le plus convenable* pour les piles que je viens de décrire est d'une grosseur de 7/10 de millimètre; il a vingt-sept mètres de longueur, et fait cent soixante-huit révolutions autour d'un châssis en ivoire E; il est recouvert par un cercle gradué F, du même métal, et fendu dans le sens du zéro, afin de pouvoir introduire dans le milieu des spires l'aiguille inférieure du système astatique. Les 168 circonvolutions de ce fil sont distribuées en quatre rangées de 42 tours chacune; elles s'étendent jusqu'à trente-cinq ou quarante degrés environ de chaque côté du zéro de la division; cette disposition est indispensable pour ne pas faire sortir, à la moindre déviation, le plan des aiguilles de la zone qui contient le fil du châssis, et pour rendre ainsi dans une certaine étendue autour du zéro, les forces déviatrices proportionnelles aux arcs parcourus.

Le châssis est vissé sur un plateau métallique H communiquant par un axe central à une vis sans fin placée au-dessous, que l'on met en action moyennant le bouton B. Une bande d'ivoire M, fixée en équerre à l'extrémité de l'axe, reçoit les bouts du fil de cuivre couvert de soie qui viennent se souder à deux petits tubes métalliques, après qu'ils ont traversé le plateau H entre deux tubes d'ivoire. Un de ces fils est indiqué en O, l'autre est caché dans la figure par la bande d'ivoire. On conçoit qu'en tournant le bouton B, la base CD, la cloche RS, le soutien LIPI'L', le fil de suspension, et les aiguilles resteront en repos; tandis que le plateau H, le châssis et tout ce qu'il supporte, ainsi que la pièce M prendront un mouvement commun de rotation autour de

l'axe. Ce mécanisme sert à amener exactement le zéro du cadran sous la pointe de l'index magnétique après la première orientation, que l'on établit d'une manière approximative en faisant jouer les trois vis de la base, et en tournant l'appareil dans l'un ou l'autre sens, jusqu'à ce que la ligne du zéro coïncide avec l'azimuth des aiguilles.

Pour obtenir une marche parfaitement régulière de l'index, et empêcher les oscillations du fil qui le supporte, il est absolument nécessaire de disposer le galvanomètre sur une tablette horizontale de marbre ou sur une planche de bois attachées à l'un des grands murs de l'édifice dans lequel on veut expérimenter; ce petit plan horizontal doit être fixé par un travail de maçonnerie sans fer ou par des clous de cuivre.

On pose donc l'instrument sur ce plan, et par les divers mouvements que je viens d'indiquer, on fait en sorte que l'aiguille visible à l'extérieur vienne se placer sur le zéro du cercle gradué. Ensuite on approche la table sur laquelle se trouvent la pile thermoscopique et tout ce qui sert aux expériences; et l'on établit enfin les communication entre les deux parties de l'appareil moyennant les fils X,X', (fig. 8), dont les deux bouts tiennent par des vis de pression, d'un côté à une petite colonne de cuivre C pour entrer dans les cavités qui communiquent avec les extrémités du galvanomètre, et de l'autre à un petit tube D du même métal pour recevoir les extrémités saillantes de la pile.

Alors en faisant agir sur l'une des faces de la pile le rayonnement d'une source calorifique, on voit l'index de l'appareil sortir aussitôt de sa position d'équilibre, et, quelles que soient les oscillations que les préparatifs des expériences, le passage des voitures, ou tout autre cause im-

priment au plancher de la chambre, on le voit effectuer sa marche horizontale sans osciller à la manière des pendules, et parcourir ainsi avec la plus grande régularité un certain arc de déviation en suivant certaines phases de temps et de vitesse que nous examinerons dans l'un des paragraphes suivants.

Nous terminerons celui-ci par quelques notions historiques sur le thermomultiplicateur, afin de montrer la série des modifications que ce précieux instrument a dû subir pour arriver au degré de perfection qu'il possède aujourd'hui.

La première idée de mesurer les températures par les courants thermo-électriques paraît due à M Becquerel: son but étant d'évaluer les hauts degrés de chaleur, il forma son *thermomètre électrique* avec des fils de platine et de palladium. Quelques années plus tard Nobili se proposa d'employer le thermo-électricisme à la confection d'un *thermoscope de contact* supérieur en sensibilité à celui de Fourier consistant, comme on sait, dans un thermomètre ordinaire autour duquel ou nouait un petit sac en peau rempli de mercure. Il se servit pour cela de bismuth et d'antimoine, métaux doués, ainsi que nous l'avons déjà annoncé, du maximum d'effet thermo-électrique; il en forma une pile plongée presqu'entièrement dans une boîte cylindrique en bois où il versa du mastic fondu de manière à ne laisser à découvert que les seuls contacts alternes supérieurs, qui étaient réduits dans un même plan et bien polis; on tenait la boîte à la main et on touchait avec la face découverte de la pile les corps dont on voulait apprécier les différences de température. Les éléments de cette pile étaient au nombre de douze (six couples) repliés rectangulairement et en sens

contraire aux deux extrémités, afin d'empêcher le contact des parties intermédiaires lorsque ces éléments étaient soudés bout-à-bout ; leur section était de 40 à 50 millimètres carrés, et le diamètre de la boite, de deux à trois pouces. Je partis de là pour faire de ce thermoscope de contact un thermoscope de rayonnement.

M'étant aperçu, par quelques essais préliminaires, que l'action sur le multiplicateur ordinaire dépendait beaucoup plus du nombre, que de la grosseur des éléments (1), et que d'ailleurs les courants thermo-électriques n'acquièrent jamais, entre certaines limites, la tension nécessaire pour traverser les corps non métalliques, je donnai aux éléments la forme de petits barreaux rectilignes aplatis, trente à quarante fois plus légers que les barres recourbées de Nobili; je les plaçai les uns à côté des autres et les maintins isolés dans toute leur longueur, excepté aux extrémités où devait avoir lieu la soudure, par des bandelettes de papier ; j'en augmentai considérablement le nombre; je les distribuai *par rangées* ou par *faisceaux*, et je les fixai par le milieu à un anneau de cuivre intérieurement doublé de papier. Je couvris ensuite de noir de fumée toutes les parties saillantes de ma pile, et je les armai de tubes cylindriques ou de réflecteurs coniques, selon que je voulais apprécier l'action d'un faisceau de rayons parallèles, ou que je désirais recueillir la

(1) A l'époque assez reculée (1830) où je faisais cette observation, les principes sur lesquels se fonde la loi de Ohm, donnant les longueurs et les sections des fils les plus convenables pour *multiplier* la force magnétisante de chaque espèce de courant électrique, principes qui ont reçu une application si heureuse dans le télégraphe électrique de M. Wheatstone, n'étaient pas encore connus dans la science.

chaleur divergente qui provient des murs d'une chambre ou de toute autre large surface éloignée. Je donnai enfin aux assemblages des couples thermo-électriques les dispositions propres aux deux instruments indiqués dans les pages précédentes sous les noms de thermomultiplicateur *linéaire*, et thermomultiplicateur à *faisceau*. Plus tard Nobili, qui avait d'abord adopté ces formes de piles (*) voulut leur en substituer d'autres qu'il appella *à biseau* et *à rayons* (**), sortes de constructions fort ingénieuses à la vérité, mais donnant lieu toutes les deux à des *faces inégales*, qui, pour les motifs exposés précédemment, ne peuvent être employées avec confiance à l'évaluation des rayonnements calorifiques.

Quant au galvanomètre, on sait que M. Poggendorff remarqua le premier que toutes les actions ou forces déviatrices du courant électrique deviennent conspirantes en repliant le fil sur lui-même, de manière à former une spirale autour de l'aiguille aimantée; et que M. Schweigger appliqua ce principe à la construction d'un instrument auquel on donne encore aujourd'hui le nom de l'auteur. Mais comme cet appareil ne porte qu'une seule aiguille, le thermomultiplicateur serait resté bien au-dessous de la supériorité qu'il possède aujourd'hui sur les autres thermoscopes, si Nobili n'avait imaginé de rendre la spirale de Schweigger très-aplatie, de partager en deux la masse du fil métallique qui forme sa partie supérieure et d'y introduire une des aiguilles du *système astatique* d'Ampère, en laissant l'autre dehors.

Ce fut une ère toute nouvelle pour l'évaluation des faibles courants électriques, car on peut dire, sans la moindre

(*) *Bibliothèque Universelle* de Genève, Tome XLIV.
(**) *Ibidem*. Tom. LVII.

exagération, que nos moyens rhéométriques acquirent tout d'un coup, par cette heureuse combinaison, une sensibilité qui, dans certaines circonstances, surpasse de trois à quatre mille fois celle du multiplicateur de Schweigger. Cependant les aiguilles des galvanomètres construits par Nobili devinrent (à cause de ce haut degré de sensibilité et de l'ouverture pratiquée dans les circonvolutions du châssis), sujettes à l'inconvénient, déjà signalé, de ne pouvoir se tenir sur le zéro du cadran, et de se fixer, au contraire, d'un côté ou de l'autre à quelques degrés de distance; en sorte que les deux masses dans lesquelles on subdivise la partie supérieure de la spirale exerçaient sur ces aimants mobiles une véritable attraction, qui les faisait dévier un peu de leur position naturelle d'équilibre. Après beaucoup de recherches je parvins enfin à m'assurer que, pour avoir des fils de cuivre ou d'argent exempts de cette action magnétique, il ne suffisait pas d'épurer parfaitement ces métaux par les moyens chimiques les plus puissants, mais qu'il fallait surtout les tenir soigneusement éloignés pendant leur fusion de tout contact avec le fer, et les réduire en fil moyennant des filières en pierre dure, comme cela a été dit plus haut. La grande sensibilité du système astatique rendait d'autre part ses oscillations amples, lentes et nombreuses; et il fallait un temps d'attente considérable pour voir l'index ramené à la position d'équilibre voulue par la force directrice du globe, ou par cette force combinée avec l'action déviatrice du courant qui parcourait les spires de l'appareil. Je fis disparaître ce second inconvénient en substituant au cercle de carton ou d'ivoire de Nobili un disque de cuivre pur ou d'argent pur; car alors la quantité et l'amplitude des oscillations se trouvèrent considérablement réduites, sans que pour

cela l'étendue de l'arc décrit par l'index sous l'action du courant thermo-électrique subît la moindre diminution. Tous ceux qui connaissent les éléments de physique comprennent que ce perfectionnement n'était qu'une application immédiate de l'expérience du *disque tournant* de M Arago, expérience qui se trouva plus tard si heureusement expliquée par la découverte des phénomènes *d'induction.* Enfin la disposition du soutien qui porte le système astatique, le mécanisme destiné à le placer à la hauteur convenable, celui qui détermine la rotation du châssis, et presque toutes les parties du galvanomètre, furent plus ou moins modifiés selon les connaissances et le goût des habiles fabricants qui se chargèrent de sa construction. Celui qui vient d'être décrit appartient à M Rhumkorff, ingénieur bien connu des physiciens par la solidité, la précision et l'élégance des instruments qui sortent de ses ateliers.

§. 5.

Des relations qui existent entre les indications du thermomultiplicateur et les forces déviatrices correspondantes.

Nous avons vu que la résultante des forces qui maintiennent le système astatique du thermomultiplicateur dirigé vers un point déterminé de l'horizon est excessivement faible. Cependant, lorsque ce système se trouve soumis à l'action d'une force déviatrice du même ordre, il oppose toujours une certaine résistance et tend à reprendre la position initiale. Alors le mouvement des aiguilles aimantées ressemble complétement à celui d'un pendule, et nous savons que pour

être soulevé d'un arc donné le pendule exige un effort variable et croissant avec sa déviation de la ligne verticale sur laquelle il se tient en équilibre. Il en sera donc de même à l'égard des aiguilles du thermomultiplicateur chassées de leur position horizontale d'équilibre par les faibles courants thermo-électriques, employés dans les expériences sur la chaleur rayonnante.

A cela il faut ajouter que pendant la déviation du système astatique, les extrémités des aiguilles près desquelles les actions magnétiques se trouvent pour ainsi dire concentrées, s'éloignent graduellement du centre de la zone formée par les spires du fil dans lequel circule le courant, et se rapprochent de plus en plus des limites de cette zone qu'elles finissent même par franchir lorsque l'angle de la déviation atteint une certaine amplitude, ce qui rend nécessairement l'action de la force déviatrice de moins en moins efficace.

La première cause de variation ne saurait être écartée, car elle tient à la nature même des forces qui maintiennent en équilibre le système astatique. Quant à la seconde, on pourrait à la vérité s'en débarrasser entièrement en roulant le fil métallique sur un châssis circulaire complet. Mais, outre les difficultés pratiques, cette opération diminuerait trop la sensibilité de l'instrument dans les premières déviations des aiguilles, car la longueur la plus convenable du fil étant fixée d'avance, pour mettre des spires où elles n'existent pas il faudrait nécessairement les prendre où elles se trouvent, et diminuer ainsi leur nombre dans la zone qui les contient, laquelle zone s'étend, ainsi que nous l'avons vu plus haut, à 35 degrés environ de chaque côté du zéro. D'autre part, si l'on accumulait un plus grand nombre de circonvolutions près de l'axe, on rendrait sans doute plus intense la première ma-

nifestation de la force déviatrice, mais les pôles magnétiques des aiguilles sortiraient trop vite du faisceau formé par la réunion des spires, l'instrument deviendrait peu sensible à une petite distance du zéro, et, pour avoir de bonnes séries d'observations, il est nécessaire d'opérer sur des arcs d'une certaine étendue.

Ainsi l'expérience a fait prévaloir la distribution adoptée dans laquelle le fil occupe, comme nous l'avons vu tantôt, 35 à 40 degrés de chaque côté du zéro. Il faut donc nous en tenir aux conditions résultant d'une telle distribution, et tâcher de résoudre la question dans l'état où elle se trouve.

Pour y parvenir nous allons employer le thermomultiplicateur à faisceau, et déduire les rapports cherchés par la comparaison des forces mesurées sur l'instrument lui-même.

Supposons la pile, garnie de ses tubes, entre deux lampes Carcel, ou autres sources parfaitement constantes de chaleur, placées sur la direction de son axe. Il est clair que l'index du rhéomètre déviera à droite ou à gauche, selon qu'on laissera parvenir le rayonnement de l'une ou de l'autre lampe sur la face correspondante de la pile thermoscopique ; en interceptant les deux radiations à la fois par des écrans métalliques, les aiguilles reviendront à leur position initiale d'équilibre. Quand tout sera en ordre, les flammes fixes, l'air calme, l'index parfaitement immobile, on abaissera l'un des écrans, celui placé à la droite de l'observateur par exemple; l'aiguille indicatrice de l'instrument se mettra en marche, et après quelques oscillations, elle prendra une déviation stable que l'on notera soigneusement. Après quoi on relèvera l'écran; on renversera les communications de la pile avec le rhéomètre; et lorsque les aiguilles seront retournées exactement au zéro, on abaissera l'écran gau-

che. L'index abandonnera de nouveau la position d'équilibre et commencera à dévier. Comme c'est la face opposée de la pile qui reçoit maintenant la radiation calorifique, la déviation aurait lieu du côté gauche si les communications n'avaient pas été renversées; mais à cause de cette inversion le mouvement se fera à droite, et l'index prendra une certaine déviation qui pourra être rendue plus ou moins grande en approchant ou en éloignant de la pile la source de chaleur. On fera donc varier la distance de la lampe gauche jusqu'à ce que l'index marque une déviation fixe inférieure d'un degré à la déviation précédente; puis on relèvera l'écran correspondant, et l'on remettra les communications comme elles étaient d'abord.

Maintenant si nous abaissons les deux écrans à la fois, et que nous fassions opérer en même temps les deux sources de chaleur, il est évident que l'index du galvanomètre se trouvera sollicité par deux forces contraires qui différeront entre elles d'un seul degré ; la plus intense prévaudra, et l'index passera sur la droite où il prendra une certaine déviation stable. Or, l'expérience prouve que pour les 12 ou 15 premiers degrés du cadran, l'index se fixe toujours à un degré. Cela montre évidemment que dans toute l'étendue de ces arcs de 12 à 15 degrés, les forces sont proportionnelles aux angles de déviation.

Mais les choses ne se passent plus de la même manière au-delà d'une telle limite. Supposons, par exemple, qu'après avoir produit 20 degrés de déviation par l'action isolée de la lampe droite, et 19 degrés par l'action isolée de la lampe gauche, on fasse arriver simultanément les deux radiations sur la pile : l'index ne marquera plus un degré comme tantôt, mais bien un degré et une fraction,

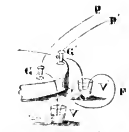
que pour plus de simplicité nous supposerons égale à 0°,5. Si l'on représente par l'unité la valeur de la force qui fait parcourir à l'aiguille le premier degré du cadran, 1,5 sera donc la mesure de la force nécessaire pour pousser l'index de 19 à 20 degrés. Prenons un second exemple : soient 30 et 29 degrés les déviations produites par les deux sources agissant séparément. Si leur action simultanée donne 2 degrés, cette quantité 2 exprimera la valeur de la force cherchée; en sorte que pour transporter l'index de 29 à 30 degrés il faudra employer une force double de celle qui est nécessaire pour le faire passer de zéro à un degré.

Tout l'artifice de cette méthode consiste, comme on le voit, *à ramener au zéro et mesurer sur une seule échelle, des forces qui, dans les circonstances où elles se trouvent par rapport à l'instrument, sont mesurées sur des échelles différentes.*

En étudiant ainsi les divers degrés du cadran et en faisant les sommes successives, on pourra donc connaître les véritables rapports des forces correspondantes à toutes les déviations de l'index galvanométrique.

La méthode que nous venons d'examiner est simple, rationnelle, et susceptible de donner des résultats assez exacts; mais elle exige beaucoup de soins, du temps, et l'emploi de deux excellentes lampes à niveau constant, que l'on ne trouve pas toujours à sa disposition.

En voici une autre qui me semble ne laisser rien à désirer pour la facilité, la promptitude, et la précision des résultats.



On prend deux petits vases V, V', à moitié pleins de mercure et on les fait communiquer séparément aux extrémités G, G', du galvanomètre, moyennant deux fils métalliques. Ces vases et ces fils ainsi disposés ne changent rien aux habitudes de l'instrument, et le courant thermo-électrique est librement transmis, comme auparavant, de la pile au galvanomètre par les fils ordinaires P, P'. Mais si, au moyen d'un fil F, on établit une communication entre les deux vases, une partie du courant passera par ce fil et rentrera dans la pile; la quantité d'électricité qui circulera dans le galvanomètre sera donc diminuée, et, avec elle, la déviation du système astatique.

Plus on facilitera le passage du courant de l'un à l'autre vase en lui offrant pour conducteur un fil plus gros ou plus court, et plus le système astatique dévié sous l'action d'un rayonnement calorifique constant se rapprochera du zéro.

Supposons donc que par cet artifice on ait réduit la déviation galvanométrique à sa quatrième ou cinquième partie; en d'autres termes, supposons que l'index du rhéomètre étant à 10 ou 12 degrés sous l'action d'une source calorifique constante placée à une certaine distance de la pile, les aiguilles descendent à 2 ou 3 degrés lorsqu'on fait dériver une portion du courant par le moyen du fil extérieur (3).

(3) Pour éviter l'embarras de la trop grande longueur du fil additionnel, nécessaire à ces essais, il faut le prendre très-mince s'il est en cuivre; on peut lui donner un plus grand diamètre si l'on veut faire usage du platine. Dans l'un ou l'autre cas on voit que ce fil variable correspond à l'élégant appareil des *bobines de ré-*

Je dis qu'en faisant varier l'éloignement de la source et en observant à chaque fois la déviation *totale* et la déviation *réduite*, on obtiendra toutes les données nécessaires pour déterminer les rapports cherchés entre les arcs parcourus par l'index de l'instrument et les forces correspondantes.

Pour rendre l'exposition plus claire et fournir en même temps un exemple de la manière d'opérer, je vais prendre les nombres relatifs à l'application de ce procédé à l'un de mes thermomultiplicateurs.

Le circuit additionnel étant rompu, et la source constante de chaleur assez éloignée du corps thermoscopique pour ne donner que 5 degrés au galvanomètre, on plaça le fil de *dérivation,* et l'index tomba à 1°,5. La communication entre les deux vases étant de nouveau interrompue, on rapprocha la source calorifique de manière à obtenir successivement :
5°. 10°. 15°. 20°. 25°. 30°. 35°. 40°. 45°.

Et en interposant à chaque déviation nouvelle le même fil de dérivation on eut les nombres suivants:
1°,5. 3°. 4°,5. 6°,3. 8°,4. 11°,2. 15°,3. 22°,4. 29°,1.

sistance de M. Wheatstone, dont l'application ne saurait malheureusement avoir lieu dans le cas actuel à cause des déviations considérables et *fort persistantes*, qui se développent dans le système astatique du galvanomètre, en vertu de la chaleur dégagée par le frottement et par la pression des ressorts sur les plaques destinées à établir les communications métalliques.

J'ajouterai que la longueur convenable du fil additionnel une fois déterminée, son application à la graduation du thermomultiplicateur est beaucoup plus expéditive, comme on va le voir, que la méthode suggérée par M. Wheatstone, à cause du manque absolu de courants thermo-électriques lorsqu'on plonge l'un de ses bouts dans le mercure, et à raison du temps très-court qu'exige l'établissement et l'interruption du courant dérivé.

Or, si l'on suppose que la force nécessaire à l'index du galvanomètre pour décrire chacun des premiers degrés du cadran soit égale à l'unité, on aura d'abord 5 pour l'expression de la force correspondante à la première observation. Les autres forces s'obtiendront aisément par la proportion:

$$1{,}5 : 5 :: a : x = \frac{5}{15}\, a = 3{,}333.\, a.$$

a représentant la déviation de l'index lorsque le circuit extérieur est fermé. On aura ainsi :

5. 10. 15,2. 21. 28. 37,3.

pour les forces correspondantes aux déviations

5°. 10°. 15°. 20°. 26°. 30°.

Ainsi dans cet instrument les forces sont sensiblement proportionnelles aux arcs jusques à près de 15 degrés. Au-delà elles commencent à s'écarter de la proportionnalité, et d'autant plus que la déviation devient plus grande. Voilà pourquoi on n'a pas poussé le calcul outre le 30me degré, car alors la valeur de *a* surpasse la limite de la proportionnalité.

Les forces appartenant aux degrés intermédiaires s'obtiennent avec la plus grande facilité, soit par le calcul, soit par la construction graphique, qui est bien suffisante à ces sortes d'évaluations, lesquelles n'exigent pas une précision supérieure au dixième de l'unité. Par ces moyens on trouve:

Degrés	13°.	14°.	15°.	16°.	17°.	18°.	19°.	20°.	21°.
Forces	13.	14,1.	15,2.	16,3.	17,4.	18,6.	19,8.	21.	22,2.
Diff.es		1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3

D.s	22°.	23°.	24°.	25°.	26°.	27°.	28°.	29°	30°.
F.s	23,5.	24,9.	26,4.	28.	29,7.	31,5.	33,4.	34,3.	37,3.
D.es		1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2



Il n'est point question dans ce tableau des degrés qui précèdent le 13me, parce que la force correspondante à chacun d'eux possède exactement la même valeur que la déviation.

Les forces appartenant aux 30 premiers degrés étant connues, rien de plus facile que de déterminer les valeurs des forces correspondantes à 35, à 40, à 45 degrés et au-delà, forces que nous n'avons pu calculer tantôt parce que les déviations réduites outrepassaient la limite de leur proportionnalité aux espaces parcourus par l'index de l'instrument.

En effet les *déviations réduites* de ces trois arcs sont:

15°,3 22°,4 29°,7

Considérons-les séparément, en commençant par la première.

D'abord 15 degrés équivalent d'après notre tableau à 15, 2: quant à la valeur x de la décimale 0,3, on l'obtiendra en multipliant cette fraction par la différence 1,1 qui existe entre le 15me et le 16me degré; car on a évidemment la proportion

$$1 : 1,1 : : 0,3 : x = 0,3$$

La valeur de la déviation réduite correspondante au 35me degré ne sera donc pas 15°,3, mais 15°,2 + 0,3 = 15°,5. On trouvera par des considérations analogues 23°,5 + 0°,6 = 24°,1 et 35°,1 + 1°,4 = 36°,7, au lieu de 22°,4 et 29°,7, pour les déviations réduites de 40 et de 45 degrés.

Maintenant il ne restera plus qu'à calculer les valeurs des forces appartenant à ces trois déviations, 15°,5. 24°,1. et 36°,7, au moyen de l'expression 3,333. a, ce qui donne:

pour les forces	51,7.	80,3.	122,3.
pour les degrés.	35.	40.	45.

En comparant ces nombres avec ceux du tableau précédent, on voit que la sensibilité de notre galvanomètre diminue considérablement lorsqu'on opère sur des déviations supérieures au 30[me] degré.

Les rapports des degrés aux forces varient de l'un à l'autre instrument ; mais dans tous les thermomultiplicateurs bien construits il se manifeste un accroissement considérable pour l'effort nécessaire à écarter les aiguilles d'un degré, lorsqu'on arrive vers cette limite de déviation, parce que selon les dispositions adoptées dans les galvanomètres qui font partie de ces instruments, le système astatique dévié d'un tel angle a ses doubles pôles tout prêts à sortir de la zone formée par les circonvolutions du fil sur le châssis. L'utilité de restreindre les mesures prises au moyen des thermomultiplicateurs, entre 0° et 30° est donc incontestable. Aussi n'avons-nous presque jamais dépassé cette dernière limite dans le cours de nos observations.

§. 6.

Avantages du thermomultiplicateur sur les thermactinomètres de dilatation.

Nous avons déja remarqué qu'en exposant le thermomultiplicateur à l'action de la chaleur rayonnante, on voit l'index sortir de sa position d'équilibre aussitôt que la radiation parvient sur le corps thermoscopique. Ce mouvement, très-lent d'abord, s'accélère graduellement, décroît de même, et s'éteint à une distance angulaire plus ou moins grande, selon l'intensité de la radiation incidente. L'index revient ensuite vers le zéro, puis il reprend sa direction primitive;

et après deux ou trois oscillations d'une fort petite étendue, il s'arrête et se fixe un peu au-dessous du point où il était parvenu dans sa première excursion. Il va sans dire que la stabilité de cette position d'équilibre sous l'action du rayonnement exige une source constante de chaleur. Le temps nécessaire à l'index pour passer de l'ancienne à la nouvelle station ne surpasse guère deux ou trois minutes. Ce temps d'attente est bien court; cependant on peut encore l'abréger si l'on prend la peine de varier plusieurs fois la distance de la source à la pile et d'observer à chaque variation le degré atteint d'abord, puis la déviation finale. En étudiant ainsi le cadran de 5 en 5 degrés, comme pour le cas des rapports entre les forces et les déviations fixes, on pourra dresser une table, qui donnera la position définitive de l'aiguille d'après la seule notion de l'arc qu'elle a parcouru en vertu de l'impulsion primitive. Alors, il suffira d'observer la première excursion pour avoir la déviation finale de l'aiguille, et, par suite, la force correspondante; de manière qu'on abrégera l'observation de toute la différence du temps que l'aiguille emploie à décrire les deux arcs; ce qui, pour certains instruments, réduit la durée de l'observation à 8 ou 10 secondes.

Cette dernière table de correspondance ne devient vraiment utile que dans certaines recherches, où l'on a beaucoup de mesures à prendre et lorsque toutes ces mesures doivent être douées d'une précision extrême, ce qui exige pour chacune d'elles une moyenne déduite d'un grand nombre d'observations ; dans ces cas-là, on laisse descendre l'index au zéro du cadran à chaque expérience, et l'on recommence l'opération.

Pour les cas ordinaires, où il s'agit plutôt de vérifier des propositions connues, que d'apporter une rigueur extrême

dans les données numériques, on peut passer directement de l'une à l'autre déviation sans ramener chaque fois l'index au zéro; et la première table suffit.

On peut enfin se dispenser d'avoir recours à l'une et à l'autre table, si l'on s'en tient aux quinze ou vingt premiers degrés du cadran, car les index des galvanomètres thermo-électriques de bonne construction prennent tous, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, des déviations qui sont à peu près proportionnelles aux forces dans toute l'étendue de ces arcs.

Au reste, que l'on observe l'instrument par les arcs d'excursion primitive ou par les déviations finales, pourvu que l'on suive les règles prescrites relativement à la pose de cet appareil, le mouvement de l'index est tellement régulier, ses indications sont tellement nettes et précises, qu'avec un peu d'habitude, on peut arriver à apprécier très-distinctement le quart du degré, qui est celui de la division circulaire en 360 parties.

Ajoutons que l'éloignement du corps thermoscopique et l'étui métallique, dont il est enveloppé, permettent de s'approcher du galvanomètre et de regarder à son aise les mouvements de l'index, sans que la chaleur propre du corps humain vienne troubler les résultats fournis par l'action calorifique explorée, comme cela arrive sans cesse dans les observations des thermoscopes et des thermomètres ordinaires, tels qu'on les a généralement employés jusqu'à présent.

Nous avons observé tout-à-l'heure que l'index du thermo-multiplicateur sort de sa position d'équilibre aussitôt que les rayons calorifiques viennent frapper la face antérieure de la pile. Il n'en est pas ainsi des thermoscopes de dilatation, qui laissent toujours apercevoir un certain intervalle entre

l'instant où les rayons arrivent sur le réservoir d'air et celui où l'index liquide se met en mouvement. Cette différence entre la rapidité des indications données par les deux appareils provient, sans aucun doute, de la couche de verre qui manque dans l'un des instruments, et oppose dans l'autre une certaine résistance à la chaleur qui doit la traverser avant de parvenir sur le corps thermoscopique (6).

(6) Quoique les indications du thermomultiplicateur soient beaucoup plus promptes que celles des thermoscopes de dilatation, elles sont cependant immensément plus lentes que les actions des deux fluides éthérés dont elles dérivent; car il faut bien distinguer le mouvement propre des fluides électriques, de celui qu'ils impriment à la matière pondérable. M. Pouillet a démontré, par une expérience très ingénieuse, que $\frac{1}{5000}$ de seconde suffit à un courant électrique d'un petit élément de Daniell pour communiquer au rhéomètre d'un de ses thermomultiplicateurs, de sensibilité moyenne, une déviation de 13 degrés. Et comme il fallait à l'index 10 secondes environ pour décrire cet arc, il s'en suit que, dans ce cas particulier, l'action rapide des agents électrique et magnétique, *qui s'est exercée pendant* $\frac{1}{5000}$ *de seconde*, se transforme en un mouvement 50000 fois plus lent, en passant de ces agents à la matière pondérable. Voici comment M. Pouillet décrit la méthode qui lui a servi à établir ce curieux résultat.

« Sur un plateau de verre de 84 centimètres de diamètre est collée une bande d'étain d'un millimètre de largeur, s'étendant, comme un rayon, de la circonférence vers le centre; là elle communique à une bande circulaire plus large, qui entoure l'axe de rotation. Supposons que le plateau tourne à raison d'un tour par seconde, et que les deux extrémités d'un circuit électrique s'appuient par des ressorts, l'une sur la bande centrale qu'il touche toujours, l'autre sur le verre du plateau près de sa circonférence : au moment où la bande d'un millimètre viendra passer sous ce dernier, il y aura communication électrique, et la durée du courant sera justement égale à la durée du passage de la bande, c'est-à-dire à $\frac{1}{2250}$ de seconde si l'on touche cette même bande près de la circonfé-

Nous avons remarqué, en outre, que si l'on opère sur une source constante de chaleur, l'index du rhéomètre prend une position d'*équilibre stable* deux ou trois minutes après la première impression du rayonnement sur la pile. Au moyen de cette propriété on parvient pour ainsi dire à éliminer dans l'usage du thermomultiplicateur un élément étranger à l'étude des rayons calorifiques : le temps ! car l'effet total étant obtenu, il devient tout-à-fait inutile de considérer l'effet produit dans un intervalle de temps donné, ainsi qu'on est strictement obligé de le faire avec les thermoscopes de dilatation, qui atteignent fort tard leur équilibre calorifique.

Quant à la sensibilité du thermomultiplicateur, elle est vraiment surprenante, surtout lorsqu'on la compare à celle des thermoscopes de dilatation. Pour en donner une idée il suffira de dire qu'étant armé de son appendice conique, cet instrument indique la chaleur du corps humain à une distance qui, dans certains cas, s'élève de 45 à 50 pieds. Si l'on place la pile thermoscopique au milieu d'une salle, quelque vaste qu'elle soit, et que l'on tourne son ouverture contre les diverses parois, on voit presque toujours l'index du rhéomètre dévier et parcourir des arcs plus ou moins étendus de l'un ou de l'autre côté du zéro. Or, ces mouvements de l'index dérivent des différences de température entre les parois de l'ambiant, différences tellement petites qu'elles passent inaperçues aux thermomètres les plus sensibles, mis au contact même des murs. Une remarque bien simple le

rence, à $\frac{1}{1260}$ si l'on touche au milieu du rayon, etc. Si le plateau fait deux, trois, quatre tours par seconde, l'on obtiendra ainsi des passages d'une durée deux, trois ou quatre fois moindre. » (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de l'Institut de France*, 1844. p. 1387 du second semestre.)

démontre avec la dernière évidence. Toutes les fois que la pile regarde le même côté de la salle, on obtient la même indication. Celle-ci provient donc d'une véritable radiation de telle ou telle partie des murs, qui fait dévier l'index du rhéomètre, tantôt à gauche, tantôt à droite, selon que la radiation, échauffant ou refroidissant la face libre de la pile, excite dans le circuit métallique un courant électrique dirigé dans l'un ou l'autre sens; loin de provenir, comme on pourrait le croire, du contact accidentel du corps thermoscopique avec quelques portions d'air plus ou moins chaud que lui.

Mais en reprenant la question de la sensibilité du thermomultiplicateur comparée à celle des thermoscopes à air, nous devons d'abord rappeller ce qui a été dit plus haut à l'égard de ces derniers instruments. Pour leur donner un haut degré de sensibilité il faut prendre des boules beaucoup plus grandes que celles des thermomètres ordinaires, et nous avons déjà remarqué, en parlant des piles du thermomultiplicateur, qu'il n'en est pas de la chaleur rayonnante comme de la chaleur de contact, où l'on peut faire ordinairement abstraction du volume de l'instrument qui sert à mesurer les températures ; tout au contraire, les petites dimensions du corps thermoscopique deviennent pour la science des radiations une condition de la plus haute importance ; car la transmission des rayons calorifiques par le plus grand nombre des corps cristallisés, la réfraction, la diffusion, et beaucoup d'autres propriétés ne sauraient être étudiées avantageusement avec des thermoscopes volumineux. La comparaison des instruments relatifs à la chaleur rayonnante doit, par conséquent, se faire sur des corps thermoscopiques réduits autant que possible dans leur volume.

Il faudra donc prendre des thermoscopes ou des thermomètres différentiels dont les boules soient d'un diamètre égal *tout au plus* au côté de nos piles à faisceau, savoir : un centimètre. Il sera en outre indispensable de les ajuster au fond de tubes parfaitement semblables à ceux que porte la pile, afin de les placer dans les mêmes circonstances. Ces conditions remplies on allumera, à une distance considérable des deux appareils, une petite bougie et on l'approchera lentement. On verra d' abord le galvanomètre donner des signes de la chaleur incidente sur la pile, pendant que l'index du thermoscope à air restera tout-à-fait immobile. En continuant d'approcher la bougie, la déviation du galvanomètre augmentera sans cesse, et la colonne liquide du thermoscope conservera son immobilité. Cette colonne se mettra enfin en mouvement, mais seulement lorsque la source de chaleur sera très-rapprochée. Les carrés des distances, auxquelles le thermomultiplicateur et le thermoscope réduit commencent à ressentir l'influence calorifique, donnent, ainsi que nous le verrons bientôt, le rapport approximatif de sensibilité des deux instruments. Par cette méthode fort simple on peut s'assurer qu'un thermomultiplicateur ordinaire est encore de 45 à 50 fois plus sensible que les meilleurs thermoscopes de dilatation.

Cette grande sensibilité sous un petit volume, bien suffisante et au-delà, comme nous le verrons plus tard, pour soustraire l'instrument à l'action perturbatrice de l'échauffement des corps qui modifient la marche ou l'intensité de la chaleur rayonnante, ayant en outre l'avantage immense de pouvoir varier à volonté et de reprendre ensuite sa valeur primitive, la facilité de recueillir l'effet calorifique produit par un faisceau de rayons d'une forme quelconque, les avanta-

ges qui résultent de la séparation complète du corps thermoscopique et de l'indicateur, la promptitude, la régularité, la précision indiquées tantôt dans la marche des aiguilles, tant de précieuses qualités, en regard des nombreux défauts que présentent les thermoscopes à air, nous engageront presque toujours à préférer, dans nos études sur la chaleur rayonnante, les thermactinomètres électro-magnétiques aux thermactinomètres de dilatation.

On verra toutefois que l'on peut employer ceux-ci avec avantage pour vérifier certaines propriétés des rayons calorifiques découvertes au moyen du thermomultiplicateur, ce qui devient fort utile dans les cours publics, attendu la facilité de se procurer un nombre quelconque de ces appareils, et la possibilité de rendre leurs indications ostensibles devant un nombreux auditoire.

§. 7.

Parallèle entre les deux principes qui servent de base aux instruments destinés à l'étude de la chaleur rayonnante.

Après avoir décrit les différentes espèces d' instruments au moyen desquels on compare les intensités des rayonnements calorifiques, nous allons reprendre la question relative aux principes qui leur ont servi de base, et tâcher de découvrir les relations qui existent entre les variations de volume, les intensités des courants thermo-électriques, et les proportions de chaleur correspondantes. Cette étude est indispensable pour nous former une idée nette du sens que nous devons attacher à nos mesures ultérieures et aux propositions qui s'en déduisent.

La sensation que la chaleur produit sur notre organisme étant variable selon les circonstances qui affectent un même individu, variable avec les actions calorifiques antérienrement subies, et pouvant ainsi conduire à des jugements erronés, nous avons eu recours à deux autres effets de cet agent qui semblent plus susceptibles de donner des points exacts de comparaison; ces effets sont: la dilatation, et le développement des courants thermo-électriques.

Tous les corps changent de volume en passant de l'un à l'autre degré de chaleur. Les métaux et un très petit nombre de minéraux sont, au contraire, les seules substances qui étant convenablement disposées donnent des courants électriques par les variations de température. La généralité du premier genre de phénomène ne démontre nullement la proportionnalité générale des effets à la cause qui les produit. On a même des preuves évidentes que cela n'a point lieu dans plusieurs cas particuliers. Ainsi, lorsqu'après avoir garni une série de récipients thermométriques de liquides différents, après avoir marqué les hauteurs des colonnes respectives pendant leurs stations dans l'eau bouillante et dans la glace fondante, et partagé l'intervalle en cent parties égales, on transporte ces instruments, doués d'une même graduation, dans une pièce dont la température est intermédiaire entre les températures des deux points fixes, on les voit presque tous donner des indications différentes. Si le thermomètre à mercure marque 50 degrés, par exemple, on a 49 à 50 degrés pour l'huile d'olive ou de lin, 45 pour une solution concentrée de sel marin, 44 pour l'alcool rectifié, 25 pour l'eau. De là il résulte évidemment que, si les dilatations successives du mercure et des huiles de lin et d'olive sont proportionnelles aux variations de chaleur com-

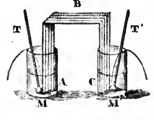
prises entre o, et 100 degrés, celles des autres liquides suivent une loi différente.

En réfléchissant sur la cause de ces irrégularités, on a cru la trouver dans *la proximité du corps au changement d'état;* de telle sorte que les liquides qui, à la température ordinaire, sont plus éloignés de leur transformation, les liquides les plus rebelles, pour ainsi dire, à l'abandon de leur mode d'existence actuelle pour se métamorphoser en corps solides ou gazeux au moyen de la congélation et de l'ébullition, seraient ceux qui donneraient la plus grande régularité et se dilateraient ainsi, entre certaines limites, proportionnellement aux variations correspondantes de chaleur.

Cette opinion fondée sur la marche sensiblement parallèle des liquides qui entrent en ébullition à une température fort élevée devient encore plus probable par l'uniformité de dilatation de chaque métal et de chaque espèce de verre sous tous les degrés de l'échelle thermométrique ; car ces corps ne se fondent qu'à des températures élevées. Elle acquiert enfin un nouveau degré de force lorsqu'on compare le thermomètre à mercure au thermomètre à air. En effet, il est bien connu qu'entre les limites de la glace fondante et de l'eau bouillante, ces deux instruments fournissent exactement les mêmes indications. On sait aussi, d'autre part, que tous les gaz se comportent comme l'air atmosphérique, et que, s'ils ne se dilatent pas précisément de la même quantité comme on l'avait cru d'abord, ils donnent du moins des dilatations proportionnelles pour un grand intervalle de température. Or l'air et d'autres gaz n'ayant pu être liquéfiés par l'action des froids les plus intenses et sous les pressions les plus fortes, on a considéré les variations de volume de ces substances comme le véritable *type thermométrique*, c'est-à-

dire, que l'on a implicitement supposé les dilatations de l'air et des gaz permanents proportionnelles aux variations de chaleur d'où elles dérivent, supposition qui fut étendue au mercure par suite du parallélisme indiqué tantôt entre la marche du thermomètre à air et celle du thermomètre ordinaire.

Mais cette proportionnalité de l'effet apparent à la cause qui le produit, si probable dans les thermoscopes de dilatation, a-t-elle lieu également pour les thermoscopes électro-magnétiques ? C'est ce que nous allons examiner maintenant.



Que l'on imagine une pile thermo-électrique ABC construite exactement sur les mêmes principes de nos piles à faisceau, avec la seule différence que les éléments, au lieu d'avoir la forme droite sont recourbés en guise de fer à cheval : les extrémités ou faces de cette pile plongent dans les récipients M, M', où se trouvent deux petits thermomètres T, T' très-sensibles et parfaitement comparables entr'eux. On met de la glace fondante dans l'un de ces récipients et de l'eau à un ou deux degrés dans l'autre. Après quoi on établit entre les extrémités du galvanomètre une communication extérieure, au moyen du fil métallique et des deux vases de mercure, dont il a été question au cinquième paragraphe, et l'on varie la longueur de ce fil jusqu'à ce que l'indication du thermomultiplicateur corresponde exactement à la différence des deux thermomètres; en sorte que l'aiguille galvanométrique s'arrête au pre-

mier degré de son échelle lorsque le thermomètre qui plonge dans l'eau marque un degré.

Cela fait, supposons que l'on opère sous une température de 10 à 12 degrés ; alors l'eau, n'ayant qu'un ou deux degrés de chaleur, se réchauffera graduellement jusqu'à ce qu'elle ait atteint la température ambiante. Maintenant, si l'on suit avec attention la marche du thermomètre plongé dans le liquide, on trouve que l'index du thermomultiplicateur marque, à fort peu de chose près, sur son cadran circulaire les mêmes indications que l'extrémité de la colonne de mercure sur l'échelle thermométrique.

Un résultat totalement analogue s'obtient sans le secours du vase plein de glace fondante. A cet effet il faut tenir l'un des côtés de la pile dans l'eau, l'autre dans l'air, que l'on aura soin de conserver à une température invariable en opérant dans l'intérieur d'une grande salle, à l'abri des courants d'air et de l'action directe des rayons solaires. Seulement, au lieu de compter la chaleur de l'eau en partant du zéro, on lui donnera une différence de 10 à 12 degrés au-dessous ou au-dessus de la température ambiante, et on notera de degré en degré les déviations galvanométriques correspondantes aux diminutions qu'y apportera l'échauffement ou le refroidissement du liquide. Dans l'un ou l'autre cas, on observera toujours une concordance assez précise entre les indications des dix ou douze premiers degrés du thermomultiplicateur et la graduation thermométrique.

L'accord des deux instruments sera encore plus précis, si au lieu de rendre, moyennant l'artifice du courant dérivé, le degré du thermomètre égal à l'un des dix ou douze premiers degrés du thermomultiplicateur, on établit l'égalité entre l'unité de cette dernière graduation et le quart, la si-

xième ou la dixième partie de l'unité de la graduation thermométrique ; ce qui peut toujours s'obtenir en prenant des thermomètres convenablement divisés, et en donnant au fil métallique, qui met en communication le mercure des deux récipients où plongent les extrémités du galvanomètre, des dimensions convenables.

Si l'on pousse l'expérience au-delà des douze ou quinze premiers degrés du thermomultiplicateur, il y a discordance entre la marche de cet instrument et celle du thermomètre, parce que alors les forces déviatrices ne sont plus proportionnelles aux angles de déviation; mais en consultant la table des rapports dressée d'après la méthode que nous avons exposée dans les pages précédentes, on trouve que les forces calorifiques correspondantes aux indications simultanées des deux instruments sont toujours égales.

Cependant, pour ne pas employer des quantités de chaleur supérieures à 10 degrés du thermomètre centigrade, il faudra amincir ou rallonger le fil qui établit la communication extérieure entre les deux extrémités du galvanomètre. Alors la quantité d'électricité qui circule dans l'intérieur de l'instrument augmentera, et l'arc correspondant à un degré de différence entre les deux faces de la pile deviendra de plus en plus considérable. Supposons, pour fixer les idées, que l'on s'arrête, lorsque cet arc est dix fois plus grand, et que le thermomultiplicateur employé soit celui même dont nous avons donné la *tabulation* au cinquième paragraphe. Dans ce cas particulier, lorsque les différences de température des côtés de la pile seront 1, 2, 3, 4, 5, le galvanomètre marquera à très-peu de chose près : 10, 20, 26, 30, 35 degrés, c'est-à-dire, les degrés correspondants aux forces déviatrices qui ont entr'elles les mêmes rapports que la série des nombres entiers.

Si l'on ôte enfin toute communication extérieure de l'une à l'autre extrémité du galvanomètre, on voit l'aiguille indicatrice d'un thermomultiplicateur ordinaire marquer de 70 à 80 degrés en vertu d'un seul degré de différence entre les températures des deux faces de la pile.

Maintenant, puisque, d'après cette dernière observation, les trente premiers degrés du thermomultiplicateur sont décrits en vertu d'une action calorifique qui est, sans aucun doute, inférieure à la sixième partie d'un degré, et que nous avons vu la proportionnalité des courants thermo-électriques aux températures se conserver assez exacte pendant dix degrés, savoir, pendant une variation de température soixante fois plus grande, si l'on suppose qu'il y ait une divergence d'un demi degré dans la somme des 10 degrés de comparaison, ce qui est certainement fort exagéré, cette divergence se réduira à $\frac{0^\circ,5}{60} = \frac{1}{120}$ pour les 30 degrés thermo-électriques composant l'étendue de l'arc usité; et par suite à $\frac{1}{30} \cdot \frac{1}{120} = \frac{1}{3600}$ environ pour un seul degré: c'est-à-dire que, s'il y avait une différence de proportionnalité égale à un vingtième dans le courant thermo-électrique développé par une action de 10 degrés de température, cette différence deviendrait $\frac{1}{3600}$ pour le courant thermo-électrique qui correspond à chacun des premiers degrés du thermomultiplicateur.

Avec ces données, qui placent tout soupçon d'inexactitude bien au-delà des limites de l'observation, on conviendra que la proportionnalité des températures aux forces de déviation correspondantes est parfaitement exacte pour toute

l'étendue de l'arc employé dans l'usage du thermomultiplicateur.

Arrêtons-nous un instant sur la valeur des ces dernières expressions. Dire que les forces correspondantes aux indications des trente premiers degrés du thermomultiplicateur sont exactement proportionnelles aux températures, signifie que les petites actions calorifiques, dont la somme totale est inférieure à un sixième de degré thermométrique, excitent dans la pile de bismuth et d'antimoine des courants d'électricité qui augmentent ou diminuent selon la même loi, et *rien de plus*.

Ainsi la proposition énoncée ne conduit nullement à la conséquence que la marche parallèle de la dilatation du mercure et des courants explorés doive continuer au-delà des limites de l'observation, et encore moins qu'elle doive avoir lieu pour des appareils thermo-électriques quelconques. On ne saurait affirmer par conséquent, d'après le résultat de nos expériences, que les courants développés par des combinaisons thermo-électriques différentes de la succession de bismuth à l'antimoine, et même les courants fournis par la chaîne métallique qui constitue la pile du thermomultiplicateur échauffée au-delà des limites usitées, sont proportionnels aux degrés du thermomètre : il paraît même fort naturel de croire, et cela résulte d'ailleurs de plusieurs séries d'expériences déjà entreprises sur ce sujet, qu'il y a dans l'un et l'autre cas des déviations plus ou moins considérables. Mais ne les trouve-t-on pas aussi dans la marche comparée du thermomètre à mercure et des thermomètres formés par les autres liquides ? Ne voit-on pas le premier de ces instruments s'écarter du thermomètre normal, c'est-à-dire du thermomètre à air, lorsqu'on dépasse seulement de

30 à 40 degrés la température de l'eau bouillante? Et cependant on consulte en toute sûreté le thermomètre à mercure quand il s'agit de températures comprises entre les deux points fixes de sa graduation, par la raison bien simple qu'il y a alors concordance parfaite entre cet instrument et le thermomètre à air. Or, comme nous sommes dans un cas tout-à-fait analogue relativement à notre comparaison du thermomultiplicateur avec le thermomètre ordinaire, les deux instruments se trouvent évidemment dans les mêmes conditions, et méritent le même degré de confiance.

Ces réflexions suffiront, je l'espère, pour montrer combien étaient mal fondées les objections contre l'usage du thermomultiplicateur déduites du désaccord observé pour un intervalle plus ou moins grand de température, entre la marche du thermomètre et l'intensité des courants thermo-électriques.

On a soutenu que ces courants ne sont pas de même force pour les différentes proportions de chaleur répandues dans le milieu ambiant. Les expériences citées à l'appui de ce principe ne me paraissent ni assez nombreuses, ni assez concluantes pour décider entièrement la question. Cependant, si une longue pratique du thermomultiplicateur peut ajouter une donnée de plus à la solution du problème, je dirai qu'en employant la même source calorifique et un thermomultiplicateur dont le système astatique était parvenu à un état de stabilité bien reconnu, il m'a toujours semblé que pour avoir la même déviation rhéométrique il fallait situer la source à une distance un peu plus grande l'été que l'hiver; ce qui indiquerait que la sensibilité de l'instrument augmente avec la température, quoiqu'il y eût quelques raisons de croire à un effet in-

verse. J'ai même tenté de m'assurer directement du fait en opérant dans l'air porté artificiellement à divers degrés de chaleur ; mais les résultats ainsi obtenus furent trop inconstants pour me permettre d'en tirer une conséquence décisive.

Au reste, quand même le doute d'une légère variation de sensibilité par suite du changement de température deviendrait une vérité irréfragable, il n'en résulterait pas pour cela la moindre incertitude dans les mesures prises au moyen du thermomultiplicateur; puisqu'en déterminant, à une distance fixe et avec toute l'exactitude convenable, l'arc de déviation produit par le rayonnement d'une source calorifique constante, au commencement et à la fin de chaque série journalière d'expériences, on trouve toujours les deux valeurs obtenues sensiblement égales. La variation de sensibilité de l'instrument ne pourrait donc se développer qu'en passant de l'une à l'autre série. Mais alors on serait précisément dans le cas d'un observateur qui fait des expériences d'optique à différentes époques du jour, ou par un ciel plus ou moins éclairé.

L'œil acquiert incontestablement un degré de sensibilité d'autant plus grand qu'il se trouve en présence d'une lumière moins vive; et cependant *on croit* à la *comparabilité* des données obtenues dans chaque série d'expériences. Comment nierait-on une semblable *comparabilité* relativement à la chaleur rayonnante, lorsque la sensibilité des appareils qui servent à mesurer cet agent ne varie réellement pas pendant toute la durée des observations journalières, ainsi que nous venons *de le prouver*?

Mais si la force de l'habitude l'emportait sur le raisonnement et qu'on hésitât encore à se servir des thermomulti-

plicateurs pour l'étude de la chaleur rayonnante, je renverrais à la fin du troisième chapitre, dans lequel les esprits les plus sceptiques ne peuvent manquer de céder à l'évidence d'une méthode expérimentale très-précise, qui démontre, *indépendamment de toute comparaison avec le thermomètre,* l'exactitude des rapports fournis par le thermomultiplicateur entre les intensités des rayons calorifiques.

CHAPITRE II.

DES SOURCES CALORIFIQUES, ET DE L'ÉGALE ABSORPTION QUE LEURS RAYONS ÉPROUVENT PAR L'ACTION DU NOIR DE FUMÉE.

Nécessité de températures invariables dans les foyers rayonnants. Moyens d'obtenir cette condition pour les divers cas de chaleur obscure ou lumineuse. Le pouvoir émissif des courants d'air portés à un très-haut degré de chaleur est sensiblement nul. Changements que l'absorption d'un corps éprouve, généralement parlant, sous l'action d'une même quantité de chaleur tirée de différentes sources. Expériences d'où l'on déduit la constance du pouvoir absorbant du noir de fumée pour toute sorte de rayons calorifiques.

§. 1.

Description de quelques sources constantes de chaleur représentant les principales phases de l'échauffement des corps.

Pour étudier les propriétés de la chaleur rayonnante il ne suffit pas de posséder des instruments qui donnent les in-

tensités relatives de cet agent, il faut aussi pouvoir reproduire avec facilité les radiations calorifiques de différentes origines, et leur conserver la même énergie pendant toute la durée des expériences.

Déjà nous avons senti la nécessité de cette invariabilité dans les rayonnements, lorsqu'il fallait déterminer les rapports des déviations aux forces pour les indications du thermomultiplicateur : quelques lampes à niveau constant ont alors suffi aux conditions qui nous étaient imposées par la nature du problème.

Maintenant il nous faut aller plus loin, car l'invariabilité de la température doit être obtenue, non seulement dans les lampes, mais aussi dans les diverses sources de chaleur qui donnent les périodes les plus remarquables de l'échauffement et de l'incandescence des corps.

A cet effet on ne pourrait employer, selon la méthode suivie par nos prédécesseurs, un lingot de fer ou d'autre métal, porté à différents degrés de chaleur par son immersion préalable dans les charbons ardents, ou autres milieux plus ou moins chauds ; car un tel état de température serait nécessairement transitoire et ne remplirait pas les conditions indispensables à la solution de presque toutes les questions relatives à l'étude des radiations calorifiques.

Mais la facilité d'avoir des flammes sensiblement constantes en volume et en température va nous fournir les moyens nécessaires pour parvenir au but proposé.

Et d'abord, l'eau maintenue à l'état d'ébullition par une petite lampe communiquant toujours la même température au récipient qui la contient, ce récipient lancera de tous les points de sa surface extérieure des rayons de chaleur obscure qui proviendront d'une source invariablement fixée à 100

degrés du thermomètre centigrade. Il faudra seulement avoir soin d'augmenter autant que possible l'énergie du rayonnement calorifique, en noircissant la surface extérieure du vase à la flamme d'une bougie (7), et de ne pas négliger de placer

(7) L'expérience de Leslie, d'où résulte que le noir de fumée est un des corps qui rayonnent la plus grande proportion de chaleur, est connue de tout le monde. Un vase cubique de métal a l'une de ses faces latérales bien décapée et polie ; les trois autres sont couvertes de différentes substances. Si l'on remplit ce vase d'eau chaude, et si l'on observe l'action exercée par ses parois, ainsi préparées, sur un appareil thermoscopique placé à une certaine distance, on voit que les effets plus faibles ont lieu pour les métaux, les plus énergiques pour toutes les substances terreuses et les matières organiques, parmi lesquelles figure au premier rang le noir de fumée.

C'est au moyen de la même méthode expérimentale que Leslie et ses partisans déduisirent une proposition qui a longtemps troublé la science, et que l'on trouve encore malheureusement admise dans plusieurs ouvrages spéciaux, très-estimables d'ailleurs, de physique et de mathématiques appliquées. Comme cette proposition se rapporterait à une propriété générale des corps rayonnants, et aurait ainsi une très-haute importance, relativement à l'agent qui forme l'objet de nos recherches, et que, d'autre part, je crois en avoir parfaitement démontré l'erreur, il ne sera peut-être pas inutile d'exposer ici la série des raisonnements et des faits sur lesquels je me suis appuyé pour atteindre ce dernier but. Mais voyons d'abord l'expérience et l'argumentation de Leslie.

Si au lieu de couvrir les faces latérales du vase échauffé avec différentes substances, on en laisse deux à l'état naturel, et qu'ensuite on raye l'une d'elles avec l'émeri, le burin ou la lime, en conservant à l'autre son brillant métallique, le cube rempli d'eau chaude et tourné vers l'appareil thermoscopique donne plus de chaleur du côté rayé que du côté poli. *Les surfaces raboteuses rayonneraient donc*, d'après le physicien écossais, *plus énergiquement que les surfaces lisses et polies.*

Remarquons d'abord que cette proposition peut être considérée

des écrans métalliques devant la lampe, afin d'intercepter tout rayonnement direct ou réfléchi de cette source de chaleur, et pour ne laisser parvenir sur le corps thermoscopique

sous deux points de vue : l'un général comprenant l'ensemble des substances rayonnantes, l'autre relatif à chacune de ces substances en particulier.

La comparaison des valeurs des divers pouvoirs émissifs exclut complétement la première interprétation ; car on trouve plusieurs corps à surfaces rudes et dépolies qui rayonnent moins que d'autres corps parfaitement lisses et unis. Les lames métalliques brutes, par exemple, telles qu'on les retire de la fonte solidifiée dans les moules de sable le plus grossier, ou modifiées de manière à présenter des surfaces mates inégales et raboteuses, sont toujours douées d'un pouvoir émissif inférieur de beaucoup à ceux du verre, des cristaux, des vernis, de l'eau et des liquides en général, qui, malgré l'égalité parfaite et le poli de leurs surfaces, rayonnent avec la plus grande énergie.

Le principe que nous allons discuter doit donc être pris dans le sens qui semble résulter si clairement du fait lui-même, savoir : qu'un corps donné rayonne plus de chaleur lorsque sa surface est raboteuse que dans le cas où elle possède un haut degré de poli.

Cependant un examen plus approfondi démontre que l'expérience de Leslie n'est pas aussi décisive qu'on le dirait au premier abord. En effet lorsqu'on raye l'une des parois du cube, lorsqu'on y forme des pointes et des arêtes aiguës, on subdivise le métal et on facilite par là son union avec l'oxygène de l'atmosphère. Or, les oxydes ayant un pouvoir émissif beaucoup plus grand que les métaux dont ils tirent leur origine, il serait possible que l'augmentation observée ne provînt pas directement des inégalités de la surface, mais d'un léger voile d'oxyde qu'elles provoqueraient sur le métal subdivisé. Pour voir si les choses se passent réellement ainsi, je répétai l'expérience sur des lames d'argent, d'or et de platine : mais j'obtins encore la même augmentation du pouvoir rayonnant sur la surface rayée.

Ainsi les effets de l'affinité chimique ne suffisent point pour rendre raison du phénomène. Il est possible, et même très-probable,

que les rayons vibrés par la paroi du récipient contenant l'eau bouillante (fig. 9).

Une lame métallique verticale noircie, avec de légers re-

que des voiles plus ou moins apparents d'oxyde, ou d'air condensé par les surfaces rayées, contribuent à l'augmentation observée du pouvoir rayonnant dans les lames de plomb, de cuivre, d'étain, de fer et de platine. Mais il faut bien convenir que ces voiles ne sauraient avoir la même part dans le phénomène lorsqu'il s'agit de l'argent et de l'or, qui donnent cependant, entre les pouvoirs rayonnants de leurs surfaces polies et rayées, des différences aussi grandes que le cuivre ou le platine.

Une objection beaucoup plus formidable à l'effet prétendu que les *inégalités de surface* exerceraient, par rapport au rayonnement calorifique, dérive du petit nombre de substances explorées. L'action des rayures sur le pouvoir émissif, constatée au moyen du cuivre, de l'argent et de quelque autre métal, donnait-elle le droit d'en déduire une proposition générale applicable à tous les corps de la nature? Non sans doute; car il fallait s'assurer d'abord si d'autres matières susceptibles du poli se comportaient comme les métaux. Or si l'on soumet à l'expérience des lames de marbre, de jais, ou d'ivoire, on ne trouve absolument aucune différence entre les quantités de chaleur rayonnées par ces substances, polies, dépolies, ou sillonnées d'une manière quelconque. Ces recherches peuvent être étendues avec le même succès à des corps doués d'un poli naturel, au fer oligiste, au quartz, à la sélénite, aux pyrites de cuivre et de fer, et autres corps cristallisés, qui se comportent tous comme le jais, l'ivoire ou le marbre.

Il paraît donc que les divers degrés de poli ou de rudesse des surfaces n'ont aucune influence sur le pouvoir émissif lorsque la paroi rayonnante est formée de substances non métalliques. *Ainsi, ce n'est pas en vertu de leur forme que les inégalités de la surface exercent sur les métaux une action tendante à augmenter le rayonnement calorifique.*

Mais quelle peut être la cause qui produit l'augmentation de pouvoir rayonnant dans cette dernière classe de corps, lorsque leurs surfaces passent de l'état poli à l'état raboteux?

bords, courbée à sa partie supérieure, et chauffée à sa surface postérieure par la flamme d'une lampe à alcool (fig. 10), nous fournira une autre source de chaleur obscure. La pré-

Nous avons déjà remarqué qu'une oxydation plus facile ou une plus grande force absorbante des gaz ambiants ne suffisent point pour expliquer le phénomène ; car l'effet des rayures serait beaucoup plus marqué sur les métaux les plus oxydables, ou sur les métaux qui absorbent les gaz avec le *maximum* d'énergie, ce qui n'est point.

On ne pourrait pas davantage attribuer l'action plus intense de la lame rayée à quelques particules de fer ou d'émeri que les outils employés laisseraient adhérentes au métal ; puisqu'en opérant avec la pointe d'un diamant on trouve encore la même augmentation de pouvoir émissif.

La forme, la combinaison chimique et l'adhérence des gaz ou des molécules solides hétérogènes étant écartées, il ne reste plus à chercher la cause du phénomène que dans la variation de densité résultant des opérations nécessaires à mettre les lames dans les conditions exigées par l'expérience.

Les physiciens et les ouvriers savent parfaitement que, sous le coup du marteau ou la pression du laminoir, les métaux *s'écrouissent*, c'est-à-dire qu'ils acquièrent une certaine raideur provenant, selon toute probabilité, d'une espèce de croûte ou enveloppe superficielle plus dense et plus élastique que la partie intérieure. Maintenant, lorsqu'un corps dur vient à rayer la surface, il enlève quelques parcelles de cette enveloppe, et découvre par conséquent le métal moins dense placé au-dessous. Les parties de la croûte elle-même, déchirées par les rayures, se détendent et deviennent plus molles et plus légères vers leurs bords. Admettons, pour un moment, que le pouvoir émissif de chaque corps augmente lorsque sa densité diminue, et nous concevrons aussitôt comment le métal rayonne moins avant qu'après avoir été dépoli.

Cette manière de voir conduit à la conséquence qu'une lame métallique inoxydable douée d'une densité uniforme dans toutes ses parties rayonnera avec la même intensité quel que soit l'état de sa surface.

sence de la flamme augmente d'abord rapidement la température du métal; mais bientôt la quantité de chaleur perdue par le rayonnement et le contact de l'air arrive à compenser

Pour vérifier le fait je fis fondre et jeter de l'or très-pur dans des moules de fer portés à une haute température, qui furent ensuite refroidis très-lentement. Les lames qui résultèrent de cette opération avaient deux millimètres d'épaisseur. Après les avoir bien polies avec une peau de daim humide et du rouge d'Angleterre en poudre impalpable, on souda deux de ces lames sur les parois contiguës du vase de cuivre destiné à recevoir l'eau chaude; puis, on mesura leurs pouvoirs émissifs, qui furent trouvés parfaitement égaux, comme il était facile de le prévoir, puisque les deux lames étaient composées de la même substance et avaient été exactement soumises aux mêmes opérations. Alors on en raya une au diamant; on mesura le pouvoir émissif de cette surface rayée, et on trouva qu'il n'avait subi aucune altération, comme cela devait être d'après la théorie que nous venons de développer.

Des faits encore plus décisifs, et tout-à-fait inattendus, se manifestèrent sur l'argent pur converti comme l'or en lames fondues et lentement refroidies. Les moules dans lesquels on jeta le métal étaient en sable fin et beaucoup plus grands que dans le cas de l'or, en sorte que l'on pût en former deux des parois latérales entières du vase cubique; les deux autres furent construites avec de l'argent tiré de la même masse qui avait fourni les lames fondues, mais après avoir été bien travaillé et forgé, pour ainsi dire, à grands coups de marteau. Ces quatre parois reçurent ensuite un beau poli, moyennant le charbon *doux* imbibé d'huile. Enfin on raya profondément et régulièrement la surface extérieure d'une lame de chaque couple au moyen d'une pointe émoussée de diamant. Les quatre côtés du vase, chauffés par l'eau bouillante et tournés successivement contre l'appareil thermoscopique, fournirent les données suivantes :

		polie	rayée
Plaque	forgée. . . .	10.°	18.°
	fondue. . . .	13°,7	11°,3

Ainsi pour l'argent écroui au marteau la radiation plus énergique

la chaleur acquise par le contact de la flamme, et la lame se maintient à une température invariable. On peut s'en assurer aisément en explorant le rayonnement de la lame

était, comme à l'ordinaire du côté de la surface rayée. Mais pour l'argent fondu *le rayonnement de la surface raboteuse se montra* *MOINS ÉNERGIQUE que celui de la surface polie!*

Ce curieux résultat, *renversant de fond en comble l'ancienne théorie*, constitue au contraire un argument favorable à la nouvelle manière d'expliquer le phénomène.

Et d'abord, puisque la lame polie d'argent forgé donne 10 degrés, tandis que la lame polie du même métal fondu fournit 13°,7, la première rayonne moins que la seconde; et le principe admis tantôt, relativement à la diminution de pouvoir émissif que le même corps subit dans le cas où sa densité augmente, est vrai et prouvé directement par l'expérience. Maintenant, lorsque l'on raye le métal fondu, on exerce une certaine pression sur les parties creusées. Si la matière est tendre et peu élastique, il peut donc se faire que le fond des sillons devienne plus dense, et diminue par cela même son pouvoir émissif.

Un autre argument en faveur de notre théorie résulte des diverses quantités de chaleur rayonnées par les surfaces polies et dépolies du verre trempé et du verre recuit.

Quatre plaques de même grandeur coupées sur une même pièce de verre à miroir, ayant une épaisseur de 11 millimètres, furent rougies au feu. On en refroidit deux brusquement en les agitant avec rapidité dans l'air; on abandonna les autres pendant vingt-quatre heures au milieu de cendres brûlantes afin de les laisser refroidir très-lentement, et éviter ainsi la moindre trace de trempe. Alors on raya au diamant une plaque de chaque espèce et l'on réunit les deux couples de manière à former les quatre parois latérales d'un vase, qui fut ensuite rempli d'eau chaude. Les deux lames de verre *recuit* se montrèrent également rayonnantes; celles de verre *trempé* donnèrent au contraire 29°,7 et 28 degrés pour les valeurs relatives de leurs pouvoirs rayonnants; l'action plus intense étant du côté de la surface rayée. On sait que la trempe produit dans le verre une espèce de croûte superficielle plus dense que les parties internes, tandis que le recuit communique la même densité à toutes ses parties; dans

avec le thermomultiplicateur placé à une certaine distance ; car alors on voit l'index de l'instrument quitter le zéro et s'en écarter de plus en plus pendant les 8 ou 10 premières

le verre, comme dans les métanx, l'inflnence dn dépoli n'est donc eensible que dans le cas où lee parties intérieures de la masso ne possèdent point les mémes conditions de densité que les couches rayonnantes eitnées prèe de la surface.

Concluons quo l'opinion admise pendent longtemps à l'égard de l'influence exercée par l'état dee surfacea snr le pouvoir émissif des eubstancee solides est tont-à-fait erronée. Un eorps inaltérable et doné de la même densité à l'extérienr et à l'intérieur, rayonne vers nne direction déterminée de l'espece en donnant la même quantité de chaleur quel qne soit son degré de poli. Loreque le corps est altérable par le contact de l'air, on snecoptible d'acqnérir nne densité plus grande à la snrface qn'à l'intérieur, le dépoli et les sillons augmentent ordinairement lo ponvoir émissif, et qneiquefoie iis lo diminuent, non pas directement par le eimple passage de l'une à l'autre forme extérienre, mals par un changement intime qne ees modifications opportent dans la nature ou la deneité dee couches rayonnantes.

On a eoutenn dernièrement, qno tous les eorps réduite en poudre poeeèdent le même ponvoir émissif. Meie d'abord une telle propoeition ne sanralt avoir, quant à présent, un sens géoéral: 1°, paree que l'argent transformé en poudre oussi fine que poesible par lee moyens chimiquea, donne tonjonrs beaucoup moins de chalenr rayonnante qne le noir de fumée; 2°, parce que les liquides et les substances terreuses ou orgeniques eo moutrent toutee donée d'un ponvoir émiseif sensiblement égal à eelni du noir de fumée, quel qne soit d'aillenra lenr état d'aggrégation: on doit donc en limiter la portée à un certain nombre de métaux, et alore cette proposition rentre évidemment dans le principe précédent, et prend nne signification tonte différente de celle qu'on a bien voulu lui prêter.

Les méteux se montrent sane doute donés d'un grand ponvoir émiesif, lorsqu'ile sont appliqués sur lo cube de Leslie à l'état de précipités chimiques. Mais si l'on considère qn'en perdant lenr état d'aggrégation les particnles métalliques deviennent nécessairement moius denses vere lenrs surfacee dégagées des effets de la force

minutes ; puis s'arrêter à une certaine déviation , et s'y maintenir indéfiniment.

La température de cette seconde source de chaleur obscure est beaucoup plus élevée que la précédente; elle arrive à 360 et même 400 degrés centigrades, lorsque la lame, avec une épaisseur d'un tiers de millimètre et une surface de vingt à vingt-deux centimètres carrés, se trouve avoir le tiers environ de la face postérieure occupé par la flamme. On obtient cette mesure par la *méthode des mélanges*, qui consiste, comme on sait, à observer l'élévation de température produite dans une certaine masse d'eau par l'immersion d'un corps chauffé à un degré connu de chaleur, à noter ensuite l'élévation de température communiquée à une égale quantité d'eau par le même corps porté à la température inconnue de la source; la valeur de celle-ci se déduit alors en divisant la dernière quantité par la première, et en multipliant le quotient par la température de la source connue.

Il est vrai qu'un tel procédé, comme tous ceux proposés jusqu'à présent pour la détermination des hautes températures, ne donne qu'une simple approximation. Mais cela suffit

de cohésion et de la pression de masse, si l'on considère, d'autre part, que les métaux en poudre exercent sur l'air atmosphérique et sur les gaz en général une absorption beaucoup plus puissante que sous forme de lames, on se persuadera aisément que l'effet obtenu dérive, comme dans les cas qui précèdent, de la raréfaction des couches superficielles et de la formation d'une atmosphère de gaz condensé autour des particules métalliques.

En résumé, les états de division, de poli, ou de rudesse n'ont aucune influence sur le pouvoir émissif, et tous les changements d'intensité observés sur le rayonnement d'un corps proviennent des variations de densité ou de qualité communiquées à ses couches superficielles.

à notre but, car enfin peu nous importe de savoir le degré précis de la température en question ; il fallait seulement constater qu'elle est supérieure de beaucoup à 100 degrés et ne produit autre chose que de la chaleur obscure. La méthode indiquée met hors de doute la première circonstance; quant à la seconde, elle résulte de l'observation de l'appareil dans l'obscurité.

Une spirale de platine convenablement appliquée à une troisième lampe à alcool va nous donner la phase si intéressante des métaux rougis au feu, et des corps incandescents en général. Pour obtenir cette espèce particulière de source calorifique, il faut d'abord renoncer aux grandes flammes inquiètes et remuantes, et se tenir aux petites qui sont toujours beaucoup plus stables. Ayant donc arrangé la mèche de manière à ce que la lampe fournisse une flamme d'environ 15 millimètres de hauteur, et 8 millimètres de largeur vers sa base, on forme avec un fil de platine, ayant un demi-millimètre d'épaisseur, une spirale de volume égal à celui de la flamme; ou, ce qui vaut encore mieux, on construit d'abord la spirale de platine sur les dimensions que je viens de dire, puis on arrange la mèche de la lampe afin que sa flamme acquière le même volume. On suspend enfin la spirale à une petite tige recourbée, dont la partie droite pénètre dans un tube vertical fixé à côté de la lampe, et, en abaissant plus ou moins la tige, on fait en sorte que les dernières circonvolutions du fil de platine viennent tout juste à la hauteur où commence la combustion vive de l'alcool, et que le reste plonge dans les couches superficielles de la flamme, qui sont les seules d'où la lumière se dégage (fig. 11.). On observe alors un phénomène qui résume, pour ainsi dire, deux expériences bien connues de H. Davy:

le fil de métal soutire à la flamme assez de chaleur pour lui faire perdre sa lumière, et il en acquiert assez pour passer lui-même à l'état d'incandescence ; tout autour des spires continue alors la combustion lente de l'alcool, la flamme vive disparaît, et l'on n'aperçoit plus que la spirale rouge avec quelques lueurs bleuâtres près de la mèche. L'incandescence du métal n'atteint pas exactement le même degré partout ; les parties élevées de la spirale sont d'un rouge plus sombre que les parties inférieures. Mais nous ferons ici une réflexion analogue à ce qui a été dit tantôt. Il nous fallait une source dont la température fût beaucoup plus élevée que la précédente, une source facile à reproduire, donnant une phase bien caractérisée de l'échauffement des corps, et sensiblement invariable pendant toute la durée des expériences. Nous venons de voir que notre spirale possède les deux premières qualités. Quant à la dernière, elle est mise hors de doute, comme dans le cas précédent, par la déviation constante du galvanomètre.

Arrivés à l'incandescence, le reste de notre tâche ne présente plus aucune difficulté, puisqu'il suffit de prendre pour source de chaleur lumineuse l'un des appareils ordinaires d'éclairage. Seulement il faudra éviter les cheminées de verre, qui peuvent intercepter, et interceptent effectivement certains éléments calorifiques. Voilà pourquoi nous emploierons ordinairement la lampe de Locatelli, qui est dépourvue de cheminée, et donne une flamme sensiblement constante à cause de sa petite mèche compacte, épaisse et imbibée de sels arrêtant les mucosités et autres corps hétérogènes, et ne formant aucune de ces excroissances charbonneuses des autres lampes à courant simple.

Quelquefois, cependant, nous nous servirons aussi des

lampes mécaniques à double courant d'air et à cheminées de verre, qui, par l'invariabilité du niveau de l'huile, l'élévation de température, et la qualité particulière des rayons développés, sont éminemment propres à certaines expériences.

Nous ferons aussi usage, dans d'autres circonstances, de vases métalliques noircis contenant de l'huile d'olive ou de colza maintenus à 150, 200, ou 250 degrés par le moyen de lampes alcooliques à flammes plus ou moins volumineuses, qui fournissent à la masse échauffée du vase et du liquide autant de chaleur qu'il s'en perd par le rayonnement et par le contact de l'air. Le volume convenable de ces flammes s'obtient aisément en observant la marche plus ou moins lente, puis sensiblement stationnaire, d'un thermomètre plongé dans le liquide.

Enfin pour établir des comparaisons entre les propriétés calorifiques des flammes de différents combustibles, on peut aussi employer outre l'alcool et les huiles grasses des jets allumés d'hydrogène pur ou chargé d'autres substances, et même le mélange des gaz oxygène et hydrogène projeté sur un morceau de craie.

C'est ici le lieu de remarquer le rôle que jouent les corps solides dans le rayonnement des flammes.

On a observé depuis longtemps que la lumière si brillante, dégagée par la combustion des matières grasses et de l'hydrogène bi-carboné, tient aux particules de charbon précipitées un instant à l'état solide, avant leur transformation en acide carbonique; car l'hydrogène pur donne une lumière excessivement faible. Par un motif tout-à-fait analogue la lumière du gaz oxy-hydrogène, heurtant contre la craie, est beaucoup plus vive que celle du mélange gazeux

brûlant tout seul. Ce phénomène tient évidemment à une action de masse. Les gaz sont des corps très-légers; s'ils peuvent réussir à communiquer leur état d'incandescence aux corps doués d'une plus grande densité, la quantité de lumière devra nécessairement augmenter. La même chose a lieu à l'égard de la chaleur.

Que l'on dirige l'axe de la pile thermoscopique contre la flamme alcoolique de notre troisième source privée de sa spirale de platine, l'aiguille du rhéomètre déviera d'un certain nombre de degrés; mais la déviation s'accroîtra considérablement lorsqu'on introduira la spirale dans la flamme. — Il y a plus: — Si au milieu du courant d'air, extrêmement chaud, qui sort de la cheminée d'une lampe d'Argant, ou d'un bec à gaz, on place un petit paquet de bandes ou de fils de platine, et si l'on tourne ensuite vers lui l'ouverture de la pile, on obtient un rayonnement très-prononcé. Mais en supprimant ces bandes ou ces fils, toute action calorifique sur la pile cesse complétement. On a beau rapprocher l'instrument de la source, l'index du galvanomètre ne sort plus de sa position d'équilibre. Ainsi l'air, qui communique ou enlève la chaleur si aisément en venant au contact des corps, possède la propriété de rayonner à un degré tellement faible, qu'elle se cache à nos meilleurs instruments thermoscopiques. Je dis faible, et pas absolument nul, car il est possible, et même très-probable, que les grandes masses de l'atmosphère donnent quelques traces sensibles de rayonnement calorifique. Quoiqu'il en soit, l'expérience prouve que les fluides élastiques, à l'état pur et transparent, ne perdent par le rayonnement qu'une portion excessivement petite de la chaleur acquise, et que s'ils parviennent à se refroidir, c'est presque totalement par la

voie du contact, comme on l'a supposé jusqu'à présent en physique.

§. 2.

Absorption constante du noir de fumée pour toute sorte de rayonnements calorifiques.

Nous avons vu que les faces antérieures des appareils destinés à l'appréciation de la chaleur rayonnante sont toujours noircies. Avant d'exciter les phénomènes de dilatation ou d'électro-magnétisme qui leur servent de mesure, les rayonnements calorifiques viennent donc frapper sur le noir de fumée. Or est-on bien sûr que des rayons de même intensité, provenant de sources différentes, communiquent à cette substance la même température? Est-il bien prouvé, en d'autres termes, que les radiations des flammes, des métaux incandescents ou de tout autre corps chaud lumineux ou obscur, sont toutes absorbées dans la même proportion par le noir de fumée? La question est, comme on le voit, de la plus haute importance.

Et d'abord il est facile de s'assurer que les pouvoirs absorbants des différentes substances, loin de conserver toujours les mêmes valeurs, ainsi qu'on l'a admis jusque dans ces derniers temps, peuvent au contraire subir et subissent effectivement d'assez grandes variations en passant de l'une à l'autre source de chaleur.

Pour en avoir une preuve irréfragable on prendra la pile thermoscopique du thermomultiplicateur, et, après l'avoir soigneusement lavée à l'alcool, on appliquera sur l'une de ses faces de la craie broyée avec un peu d'eau gommée;

puis l'on étendra quelques couches de noir de fumée, préparé de la même manière, sur l'autre face, de manière que l'un des côtés de la pile soit peint à la craie, et l'autre au noir de fumée. On portera ensuite l'appareil thermoscopique ainsi préparé en présence d'une source de chaleur, et l'on observera au galvanomètre l'échauffement que ses deux faces éprouvent successivement par leur exposition au rayonnement calorifique. A cet effet il faudra tourner la pile sur son pied, en renversant chaque fois les communications avec le galvanomètre, pour que la déviation de l'index se fasse toujours dans le même sens. On répétera l'expérience sur une autre source que l'on éloignera plus ou moins, afin de produire à peu près le même effet par l'absorption de l'une des deux faces de la pile, l'absorption de la face noire par exemple ; puis l'on substituera le côté blanc au côté noir, on notera la déviation correspondante de l'aiguille, et ainsi de suite. Les moyennes de vingt résultats obtenus par cette méthode sont inscrites dans le tableau suivant.

Pouvoir absorbant de la craie, celui du noir de fumée étant représenté par 100.

56,6. . .	pour	la lampe de Locatelli.
65,3. . .	»	le platine incandescent.
83,8. . .	»	le cuivre à 400 degrés.
96,3. . .	»	le cuivre à 100 degrés.

d'où l'on déduit que les pouvoirs absorbants de la craie et du noir de fumée, très-différents pour la radiation de la flamme, se rapprochent graduellement à l'égard des sources intermédiaires, et deviennent presque égaux lorsqu'il s'agit de sources dont la température ne dépasse pas le

100me degré centigrade. Dans ce dernier cas l'on peut même démontrer que le pouvoir absorbant de la craie (et autres substances douées de propriétés analogues) donnerait une valeur numérique parfaitement égale à celle qui représente le pouvoir absorbant du noir de fumée , si les deux côtés de la pile étaient exactement placés dans les mêmes conditions de sensibilité, ce qui n'a presque jamais lieu.

En effet les soudures, qui établissent les communications entre les cinq ou six rangées d'éléments dont se composent les piles thermoscopiques ordinaires, sont rarement distribuées en nombre égal des deux côtés; l'épaisseur elle-même des soudures est rarement égale partout. Cependant, la condition de parité, à l'égard de ces deux différences , peut s'établir moyennant une construction soignée de l'appareil. Mais il n'en est plus de même pour ce qui tient à l'application de la craie et du noir de fumée ; car les compositions de ces deux substances, ainsi que leurs forces de cohésion étant très-différentes, il devient fort peu probable, pour ne pas dire impossible, que l'on puisse établir entre les profondeurs des deux couches un rapport tel, qu'il en résulte une transmission parfaitement égale de chaleur aux faces métalliques correspondantes de la pile.

Afin de se rendre tout à fait indépendant de ces diverses causes d'erreur, il n'y a qu'à opérer comme nous allons le dire.

On passera d'abord quelques couches de noir de fumée sur l'une des faces latérales d'un vase cubique de fer blanc ou de cuivre; on peindra ensuite une des deux faces contiguës avec de la craie, et on laissera le reste à l'état poli. Le vase sera ensuite rempli d'eau chaude et placé sur un soutien tournant librement autour de l'axe vertical. Ayant

disposé, à une certaine distance de ce vase, la pile dans son état ordinaire, il y aura, en vertu du rayonnement calorifique qui en émane, une action sensible au galvanomètre. Or, en tournant successivement le vase, afin de présenter au corps thermoscopique tantôt la craie, tantôt le noir de fumée, on ne verra apparaître aucune différence sur l'instrument. Les deux substances, appliquées aux parois métalliques du vase, donnent donc la même quantité de chaleur, lorsque leur température ne dépasse pas celle de l'eau bouillante (8).

Cela posé, imaginons un disque de carton mince, peint d'un côté avec de la craie, et de l'autre avec du noir de fumée. Ce petit disque, appuyé contre l'ouverture de la pile, et soumis à la radiation d'un vase plein d'eau maintenue en un état constant d'ébullition, moyennant une petite flamme cachée par des écrans métalliques polis, s'échauffera sous l'action du vase. Or on conçoit aisément, d'après ce qui précède, que, quel que soit le côté blanc ou noir tourné vers la source de chaleur, le disque devra transmettre à la pile la même action calorifique, si comme nous l'avons annoncé, les pouvoirs absorbants et émissifs de la craie et du noir de fumée sont égaux pour le rayonnement du vase plein d'eau chaude; et c'est aussi ce que l'on obtient avec la plus grande exactitude, en prenant les moyennes d'une

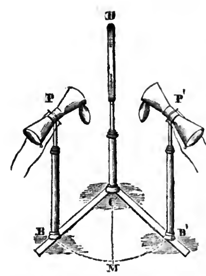
(8) On obtient le même résultat avec le carbonate de plomb et autres matières douées de la plus grande blancheur. Aucune relation appréciable ne paraît donc exister entre la coloration de la surface rayonnante et son pouvoir émissif.

Ainsi l'influence de la couleur sur le rayonnement des corps chauffés au dessous de 100 degrés est tout aussi chimérique que celle du poli, de la rudesse ou de la subdivision des parties rayonnantes.

certaine série d'expériences. En effet, dix observations de ce genre me donnèrent 100,3 pour le pouvoir absorbant moyen de la craie, c'est-à-dire que, dans cette série d'expériences, la craie soumise au rayonnement d'un corps chauffé à 100 degrés absorba, en moyenne, tout autant que le noir de fumée, sauf un petit excès en plus, qui aurait sans doute fini par s'effacer en multipliant les expériences.

Soit maintenant un disque mince de bois ou de carton, entièrement couvert de noir de fumée, dans une position verticale, isolé, et soumis à la seule influence d'une de nos sources de chaleur quelconque. Le rayonnement calorifique incident à sa surface antérieure sera complétement absorbé, ou se divisera en deux portions, l'une desquelles sera renvoyée, l'autre absorbée.

Le disque, graduellement échauffé par cette dernière portion, commencera à rayonner de tout côté la chaleur acquise; la perte augmentera avec l'élévation de température, et il y aura bientôt équilibre entre les quantités de chaleur absorbée et rayonnée dans le même intervalle de temps, de telle sorte que la température du disque finira par devenir constante. Cependant les radiations de ses deux faces ne seront pas d'égale intensité; car, celle de la face postérieure aura lieu en vertu du seul échauffement acquis par le corps sous l'action de la source, tandis que la face antérieure rayonnera à cause de cet échauffement et de la portion de flux calorifique rejetée en arrière. Ajoutons que la surface antérieure du disque, recevant la première impression de la chaleur, devra se trouver à une température un peu plus élevée que la surface postérieure et donner, *par cela seul*, une radiation plus intense.



Ceci bien entendu, supposons le pied de la pile du thermomultiplicateur fixé sur une alidade CB, mobile autour de la verticale passant par le centre du disque rayonnant; en sorte que le corps thermoscopique P, porté à la hauteur du disque échauffé D, puisse regarder successivement, sous la même inclinaison BCM, B'CM, d'environ 25 à 30 degrés, tantôt la surface postérieure, et tantôt la surface antérieure, sans intercepter aucune portion de la radiation directe; ce qui peut toujours s'effectuer en disposant entre la source et le disque un écran métallique de manière à recevoir les rayons de chaleur qui tomberaient directement sur la pile dans l'une ou l'autre position.

On obtiendra deux indications galvanométriques proportionnelles aux rayonnements des faces antérieure et postérieure du disque; ces indications comparées entre elles donneront un certain rapport. Or, en changeant la source de chaleur et en mesurant de nouveau sous le même angle les rayonnements des deux faces du disque, on s'apercevra aisément, au moyen de la constance ou de la variation de leur rapport, si le nouveau flux de chaleur incidente est absorbé dans la même proportion que le flux précédent, ou dans une proportion différente.

Mais l'expérience, effectuée avec tous les soins convenables, donne l'invariabilité du rapport susdit entre les rayonnements des faces antérieure et postérieure du disque, lorsqu'on change la source de chaleur.

Donc, le noir de fumée absorbe avec la même intensité toute sorte de rayonnements calorifiques.

La conclusion paraît sûre, et le serait en effet, si la méthode employée pour mesurer les rayonnements des deux faces du disque était irréprochable du côté théorique et du côté expérimental.

La partie expérimentale n'est certes pas exempte de difficultés; car, la moindre agitation de l'air, la moindre variation de température ou de pression atmosphérique, influent sur l'intensité de l'échauffement du disque, et par suite sur le rapport des deux radiations. Cet échauffement étant lui-même d'une grande faiblesse, les radiations qui en résultent ne peuvent être appréciées qu'avec des instruments d'une délicatesse extrême. On parvient toutefois à vaincre ces obstacles matériels et à obtenir des résultats fort comparables, en employant des thermomultiplicateurs très-sensibles, ou en adaptant aux piles des thermomultiplicateurs ordinaires des réflecteurs coniques, afin de concentrer sur le corps thermoscopique une plus grande quantité de la chaleur rayonnée par le disque; en répétant plusieurs fois les mêmes observations, en choisissant un temps où le baromètre est sensiblement stationnaire, et surtout en opérant dans un local assez vaste, hermétiquement fermé au mouvement de l'air libre, où la présence des appareils et de l'observateur ne sauraient produire que des variations extrêmement lentes de température.

Mais l'argumentation tirée de la constance du rapport

entre les deux radiations du disque ne saurait échapper à une objection formidable. En effet, ces radiations se mesurent par l'absorption de la pile; et, comme celle-ci est peinte au noir de fumée, il pourrait se faire que la répercussion de la chaleur sur le corps qui reçoit le rayonnement de la source fût complétement masquée par un phénomène semblable, reproduit à la surface de l'appareil destiné à la mesurer.

Afin de développer convenablement cette proposition, imaginons d'abord que le noir de fumée absorbe tous les rayons d'une certaine source de chaleur, et que les radiations des faces antérieure et postérieure du disque, dans le cas de l'équilibre, soient comme 5 à 4. Supposons maintenant le disque soumis à l'action d'une autre source dont le rayonnement calorifique ne soit qu'en partie absorbable par le noir de fumée. Supposons aussi, pour plus de clarté, cette seconde source assez rapprochée du disque pour que celui-ci devienne tout aussi chaud que dans le premier cas.

Alors les radiations des deux faces au moment de l'équilibre de température seront exprimées par le rapport $5 + a : 4$, a représentant la proportion de chaleur qui n'étant pas absorbée, selon notre hypothèse, par la face antérieure du disque, se trouve *dispersée* en tout sens comme cela arrive généralement dans le cas des corps exposés à la lumière.

Or, il est évident que si cette espèce particulière de chaleur rayonnée par le disque ne subissait aucune absorption sur la pile noircie, on aurait encore le rapport 5:4 pour les actions calorifiques des deux côtés du disque.

Mais nous allons voir que cela n'arrive point, et que, s'il y avait de la chaleur dispersée et non absorbée à la surface de notre disque noirci, elle n'éprouverait pas une dispersion totale sur le corps thermoscopique, et changerait en outre avec la qualité de la radiation incidente, produisant ainsi une variation dans le rapport d'intensité des rayonnements vibrés par les deux faces du disque; car ce dernier fait a lieu à l'égard d'un disque blanchi, lors même que l'on mesure la radiation de sa surface antérieure par la face blanchie de la pile.

En effet, remettons d'abord la pile dans l'état où elle se trouvait tout-à-l'heure, c'est-à-dire, peignons une de ses faces avec la craie et l'autre avec le noir de fumée. Prenons ensuite un second disque de carton égal au premier, et couvrons-le entièrement des deux côtés avec cette même pâte liquide de craie employée à teindre en blanc l'une des faces de la pile. Il est clair que l'on pourra répéter sur chacun des deux disques, exposés à un rayonnement donné, deux expériences pareilles à celles indiquées dans la page 100 avec le côté noir de la pile, et deux autres expériences complétement analogues avec le côté blanc. Toutes les fois qu'on changera la qualité de la radiation incidente on aura donc huit observations à faire.

J'ai réuni dans les deux tableaux de la page suivante les résultats que m'a fournis un couple de disques de cette espèce, soumis à cinq qualités de chaleurs rayonnantes. Chaque donnée numérique représente la moyenne de dix expériences.

QUALITÉ de la CHALEUR INCIDENTE sur le disque	DISQUE NOIR — Déviations galvanométriques produites par les radiations de sa surface			
	postérieure sur le côté de la pile		antérieure sur le côté de la pile	
	noir	blanc	noir	blanc
Cuivre à 100°	20,1	20,5	20,7	20,9
Cuivre à 400°	30,6	30,9	31,1	31,5
Platine incandescent	29,8	30,4	30,5	31,3
Lampe de Locatelli	31,2	31,6	31,9	32,4
La même lampe, munie d'une lentille de verre	2,3	2,3	2,6	2,5

QUALITÉ de la CHALEUR INCIDENTE sur le disque	DISQUE BLANC — Déviations galvanométriques produites par les radiations de sa surface			
	postérieure sur le côté de la pile		antérieure sur le côté de la pile	
	noir	blanc	noir	blanc
Cuivre à 100°	20,3	20,7	20,8	21,0
Cuivre à 400°	30,4	30,8	32,4	31,5
Platine incandescent	29,5	30,2	46,7	42,9
Lampe de Locatelli	31,4	31,9	48,4	42,2
La même lampe, munie d'une lentille de verre	1,8	1,7	49,9	40,1

Ainsi :

1.° La radiation postérieure du disque, noir ou blanc, produit constamment le même effet sur le côté noir ou blanc de la pile.

2.° La radiation antérieure du disque noir engendre, elle aussi, une action toujours égale sur les deux côtés de la pile.

3.° La radiation antérieure du disque blanc produit un effet invariable sur les deux côtés de la pile pour la source à 100 degrés, et des effets divers pour les autres sources, le côté noir de l'instrument absorbant alors une plus grande quantité de chaleur et donnant en conséquence une déviation galvanométrique plus grande que le côté blanc.

Remarquons d'abord que si le dernier résultat dépend de la qualité de la source calorifique, les deux premiers en sont tout-à-fait indépendants ; et la solution cherchée ressortira aisément du principe démontré ci-dessus, savoir : que les surfaces enduites de craie ou de noir de fumée absorbent avec la même intensité les radiations des corps qui ne dépassent pas 100 degrés, tandis qu'elles se comportent bien différemment à l'égard des rayons appartenant aux sources d'une température supérieure.

En effet, le disque soumis à l'action rayonnante de la *source principale* de chaleur élève à peine de quelques degrés sa propre température au-dessus de celle du milieu ; les radiations provenant de son échauffement seront donc absorbées dans la même proportion par le côté noir ou blanc de la pile ; et c'est aussi ce qui arrive lorsque l'instrument ne peut ressentir que la seule action de cette *source secondaire* de chaleur, c'est-à-dire, lorsque la pile reçoit

la radiation postérieure du disque (9). Mais du moment où l'on s'occupe de la radiation antérieure, il est évident qu'il faut bien distinguer la portion certaine des rayons dûs à l'échauffement du disque, et la portion plus ou moins douteuse des rayons provenant de la répercussion. Il faut voir, en d'autres termes, si l'effet dérive tout simplement de la radiation *secondaire*, ou de son mélange avec un certain nombre de rayons de la source *principale* renvoyés par le disque. Cette distinction est bien facile à établir, puisque dans le premier cas les faces noire et blanche de la pile donneront la même déviation au galvanomètre ; dans le second cas les deux déviations seront différentes. Or la radiation antérieure du disque blanc explorée par l'une et l'autre face de la pile produit des déviations, tantôt sensiblement égales et tantôt divergentes, selon la nature des rayons incidents. Donc la craie qui recouvre ce disque absorbe les flux calorifiques en une proportion qui varie avec la qualité de la source rayonnante.

Mais la radiation antérieure du disque noir explorée avec l'un et l'autre côté de la pile donne toujours le même rapport approchant de l'égalité, quelle que soit la nature de la source calorifique; les rayons de chaleur d'une origine quelconque n'éprouvent donc aucune répercussion appréciable à la surface de ce disque, c'est-à-dire que toutes les espèces de chaleur rayonnantes sont absorbées avec la même

(9) Nous disons que les radiations postérieures de l'un et de l'autre disque sont absorbées dans la même proportion par la craie et par le noir de fumée quoiqu'on observe entre les deux rapports une certaine déviation, parce qu'il a été établi tout à l'heure que ces petites déviations tiennent uniquement à une différence de sensibilité entre les deux faces de la pile.

intensité par la couche de noir de fumée qui recouvre ce corps, ou toute autro substance exposée au rayonnement calorifique. Et cette propriété est extrêmement précieuse pour nos études, attendu qu'elle communique aux thermactinomètres noircis le pouvoir d'évaluer l'intensité des rayons de chaleur indépendamment de leurs qualités spécifiques, et rend, sous ce rapport, la science do la chaleur rayonnante immensément supérieure à celle de la lumière. Car en optique les divers degrés de clarté des rayons lumineux sont toujours plus ou moins directement estimés par l'organe de la vue; et l'œil, si admirablement construit pour apprécier des différences d'intensité vraiment prodigieuses, est tout-à-fait privé des conditions nécessaires pour juger de la force relativo des lumières de diverses couleurs.

CHAPITRE III.

DU RAYONNEMENT CALORIFIQUE DANS LE VIDE ET DANS L'AIR ATMOSPHÉRIQUE.

Expériences de Newton et d'autres physiciens sur la propagation de la chaleur dans le vide de la machine pneumatique et dans le vide du baromètre. Moyens propres à démontrer la transmission rectiligne instantanée et immédiate des rayons de chaleur dans l'air atmosphérique. Expérience des miroirs conjugués ; modifications qui en rendraient les résultats plus clairs et plus décisifs. Démonstration expérimentale du rapport existant entre l'intensité de l'action échauffante et le carré inverse de la distance à la source calorifique. Conséquences qui s'en déduisent à l'égard de la *transcalescence* de l'air, et de la comparaison des rayonnements mesurés par le thermomultiplicateur.

§. 1.

Transmission de la chaleur rayonnante dans le vide.

Newton trouva que deux thermomètres renfermés dans deux récipients de verre exactement pareils, l'un desquels était vide et l'autre plein d'air, montaient ou descendaient

de la même quantité en très-peu de temps lorsqu'on les portait ensemble dans un lieu plus ou moins chaud que celui où ils se trouvaient d'abord (*). Or, puisque la propagation ordinaire de la chaleur n'a lieu que dans les cas où cet agent passe successivement et lentement de l'une à l'autre couche de *matière pondérable*, on pouvait déjà conclure de cette observation du grand philosophe anglais, que la variation éprouvée par le thermomètre, introduit dans le récipient privé d'air, tire son origine de l'échange des rayons établi, *à travers le vide*, entre les parois du récipient et l'enveloppe du thermomètre. Cependant les moyens employés pour faire le vide étant fort imparfaits du temps de Newton, on aurait pu croire que l'effet calorifique observé provenait d'un reste d'air contenu dans le récipient.

Ce fut sans doute une réflexion de cette nature qui engagea Rumford à reprendre expérimentalement l'étude de la question du passage de la chaleur rayonnante dans un espace complétement privé d'air. Comme les expériences de Rumford sont aussi concluantes que simples et ingénieuses, et que d'ailleurs on les dirait presque totalement oubliées aujourd'hui, la plupart des traités modernes de physique n'en faisant plus aucune mention, je vais les décrire ici avec les paroles mêmes de l'auteur:

« Un ouvrier habile, Arteria de Manheim, ayant réussi à fixer solidement la boule sphérique d'un thermomètre à mercure, d'un demi pouce de diamètre, au centre d'une boule de verre d'un pouce et demi de diamètre, on remplit de mer-

(*) *Voyez la XVIIIe des questions placées à la fin de* l'Optique *de Newton.*

cure l'espace compris entre la surface extérieure de la boule du thermomètre et la surface intérieure de la grande boule, par le moyen d'un long tube barométrique, qui fut soudé à une petite projection ou ouverture en forme de pointe appartenant à la grande boule, laquelle pointe se trouvait en bas quand le thermomètre, qui était attaché à la grande boule, se trouvait dans sa position naturelle verticale. »

» Aussitôt que l'espace dans la grande boule, qui n'était point occupé par le thermomètre, eut été rempli de mercure, aussi bien que le tube barométrique soudé à la boule qui avait trente-six pouces de long, l'ouverture de ce tube fut submergée dans du mercure contenu dans un bassin, et le tube fut renversé et placé dans une position verticale, avec la grande boule (contenant le thermomètre) en haut. »

« L'instrument étant alors devenu un baromètre, le mercure descendit de la grande boule et de la partie supérieure du tube barométrique jusqu'à la hauteur de vingt-huit pouces au-dessus du niveau de la surface de mercure dans le bassin, où il demeura stationnaire ; son poids étant balancé par la pression de l'atmosphère; pour lors on approcha une bougie allumée à la partie supérieure du tube, près de sa jonction avec la boule, où le diamètre du tube avait été préalablement diminué, et par le moyen du chalumeau on dirigea la pointe de la flamme contre la partie du tube où on voulait la sceller. »

« Le verre étant ramolli par la chaleur, la pression de l'atmosphère ne tarda pas à forcer les parois du tube en dedans, et l'opération fut heureusement terminée sans accident. »

« On détacha ensuite le tube barométrique, et la boule du thermomètre resta entourée de tous les côtés par un espace vide d'air; puis, le thermomètre ayant été rempli préalablement de mercure et fourni d'une échelle, on peut facilement se figurer mon impatience à voir si la chaleur serait en état ou non de franchir cet intervalle. »

« Ayant exposé cet appareil dans un baquet d'eau à la température de 18 degrés du thermomètre de Réaumur, jusqu'à ce que je fusse assuré (par le moyen de l'échelle de l'instrument) que la boule du thermomètre remplie de mercure, qui se trouvait au centre de la boule vide d'air, était à la température de 18 degrés R, j'ôtai l'instrument du baquet, et je le plongeai dans un vase rempli d'eau bouillante, où je le tins pendant plusieurs minutes, l'eau dans le vase étant constamment entretenue en ébullition par le moyen d'une lampe. »

« Comme le mercure dans le tube du thermomètre montait, quoique lentement, il était évident que la chaleur de l'eau bouillante passait, *à travers le vide*, dans la boule du thermomètre. »

« Je fis construire d'autres appareils de cette espèce; je répétai et variai mes expériences; j'observais ainsi leur refroidissement et ensuite leur échauffement, tantôt dans l'air, et tantôt dans l'eau. Dans toutes ces expériences, la boule du thermomètre, qui se trouvait entourée d'un espace vide, s'échauffait ou se refroidissait. »

« Le passage de la chaleur dans le vide était un fait d'une si haute importance dans la recherche de la nature de la chaleur, que je désirai le constater par les expériences les plus décisives. »

« Comme la partie du tube du thermomètre qui se trou-

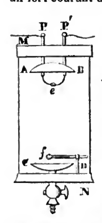
vait dans l'intérieur de la grande boule de verre était en contact avec l'air ou l'eau, dans laquelle l'appareil était exposé à se refroidir ou à s'échauffer, l'on pourrait soupçonner qu'une partie de la chaleur que la boule du thermomètre, entourée du vide, perdait ou gagnait, était communiquée par le tube du thermomètre. Pour ôter toute incertitude à ce sujet, je trouvai le moyen de faire l'expérience avec un thermomètre suspendu par un simple fil de soie, très-mince, au milieu du vide (fait avec le mercure) dans un matras de verre qui était assez haut pour recevoir et enfermer le thermomètre avec son tube. »

« Les résultats des expériences qui furent faites avec cet appareil, ne différaient pas sensiblement des résultats de celles faites avec les autres dont je viens de rendre compte, et *la propagation de la chaleur à travers le vide de Torricelli resta démontrée.* » (*)

Pendant les recherches que Dulong et Petit entreprirent dans le but de déterminer la loi du refroidissement des corps, ces deux physiciens dûrent exécuter des expériences tout-à-fait analogues à celles de Rumford, avec la différence que le globe de verre, au milieu duquel se trouvait placée la boule de leur thermomètre était de trois décimètres au lieu d'un pouce et demi de diamètre, et que le vide s'y produisait au moyen d'une excellente machine pneumatique. La chaleur passa du thermomètre central aux parois de l'enceinte, ou de celles-ci au thermomètre, comme dans les expériences de Rumford, quoique l'intervalle fût six à sept fois plus grand.

(*) *Rumford. Mémoires sur la chaleur, 1 vol. in 8.° Paris* 1804 *p.* 14 *et suiv. de la* Notice historique.

La fameuse expérience du charbon réduit à l'état d'incandescence par l'action de la pile fournit à H. Davy le moyen de constater aussi de son côté le rayonnement calorifique dans le vide. Cette expérience, que les dernières modifications apportées à l'électro-moteur de Volta mettent aujourd'hui à la portée des fortunes les plus médiocres, consiste, comme on sait, à faire traverser sous le récipient de la machine pneumatique un morceau de charbon par un fort courant d'électricité.



Soit M, N, le récipient de la machine pneumatique. On le munit à sa partie supérieure d'une garniture traversée par deux tubes de verre contenant des tiges métalliques P, P'; le tout bien mastiqué pour intercepter le passage de l'air. Entre l'une et l'autre extrémité inférieure de ces tiges est interposé le morceau de charbon *e*. Lorsqu'on met les deux pôles d'une pile suffisamment énergique en communication avec les tiges P, P', on voit le charbon passer en très-peu d'instants par tous les degrés de l'incandescence, et jeter bientôt une lumière éblouissante. Si le récipient est bien purgé d'air, le charbon n'éprouve aucune diminution appréciable, et son éclat lumineux dure autant que la traversée du courant.

Maintenant, pour montrer que dans cet état de vive incandescence il y a production et rayonnement de chaleur, on fixe le charbon au foyer *e* d'un petit miroir métallique AB, et vers l'extrémité opposée du récipient on adapte un second miroir sphérique en métal CD ayant sa concavité tournée vers AB et portant à son foyer *f* la boule d'un

petit thermomètre. Aussitôt que l'appareil est mis en activité on voit la colonne thermométrique monter successivement de plusieurs degrés. Les bonnes machines pneumatiques d'aujourd'hui, raréfiant l'air au point de ne lui laisser qu'une tension de quelques dixièmes de millimètre, on ne peut supposer raisonnablement qu'un fluide réduit à un tel degré de raréfaction produise l'élévation observée du thermomètre. Et si, malgré cela, on s'avisait encore de soutenir que ces particules d'air si atténuées, après s'être échauffées au contact du charbon ardent, viennent déposer la chaleur acquise sur le thermomètre, il suffirait de faire remarquer que, vu la disposition des diverses parties de l'appareil, la couche d'air échauffé, devenant plus légère, reste autour du corps incandescent, ou monte à la partie supérieure du vase, et ne saurait se mêler aux couches plus denses qui reposent sur le fond et autour du thermomètre.

Au morceau de charbon, on peut substituer un fil de platine d'une grosseur telle que le passage du courant d'électricité le fasse rougir sans entrer en fusion ; et même dans ce cas, où la lumière dégagée a un éclat bien moindre que la vive splendeur du charbon, on obtient encore des signes très-prononcés de chaleur sur le thermomètre.

Ainsi les radiations calorifiques des flammes et des métaux incandescents, et celles des corps chauffés au-dessous de l'incandescence sont toutes susceptibles de traverser le vide. Or, si la chaleur rayonnante provenant d'une source quelconque se transmet dans un espace où il n'existe aucune matière pondérable, il s'en suit que l'air n'est nullement nécessaire à sa propagation, et que, par conséquent, la transmission de cette espèce de chaleur dans l'atmosphère a lieu en vertu d'un agent particulier analogue à celui qui

produit les phénomènes lumineux. C'est en effet ce que nous allons démontrer nettement par l'expérience.

§. 2.

Des lois qui régissent la propagation du rayonnement calorifique dans l'air atmosphérique.

Avant d'entrer en discussion sur le sujet inscrit en tête de ce paragraphe, rappelons en peu de mots les principaux résultats consignés dans les pages précédentes, afin de bien saisir et le point d'où nous sommes partis et celui que nous venons d'atteindre.

L'action échauffante, qui a lieu à une certaine distance des corps dont la température est plus ou moins élevée au-dessus de celle de l'atmosphère, étant un fait indubitable, nous avons d'abord cherché les moyens les plus propres pour la mesurer avec exactitude. Ces moyens, une fois déterminés, nous ont permis de reporter notre attention sur les sources calorifiques, d'en choisir un certain nombre douées de températures extrêmement diverses, et de reconnaître le mode uniforme de leurs actions sur nos instruments thermoscopiques.

Dans le cours de ces études nous avons supposé que, pour agir ainsi hors du foyer, la chaleur prend une forme rayonnante et s'élance de chaque point de la source suivant des lignes droites dirigées dans tous les sens, précisément comme nous voyons la lumière diverger en rayonnant autour d'un corps en combustion. Et puisque, d'après les expériences précédentes, toute espèce de chaleur rayonnante se meut dans le vide, il est évident que l'analogie

de l'agent qui forme l'objet de nos recherches avec l'agent auquel nous devons les phénomènes de la lumière devient de plus en plus probable.

Mais le rayonnement calorifique est-il réellement comparable au rayonnement lumineux? Les lois qui président à la propagation de ces deux agents sont-elles identiques en tout point, ou diffèrent-elles sous certains rapports? Voilà les questions que nous allons examiner maintenant.

Et d'abord, cette chaleur sensible à distance, que nous supposons composée de rayons, se propage-t-elle véritablement par radiations rectilignes comme la lumière?

Pour le savoir prenons un écran métallique assez étendu, percé d'un trou à son centre, et fixons-le verticalement; plaçons à une distance de quelques décimètres, et à la même hauteur du trou central, d'un côté la lame de cuivre chauffée à 400 degrés, de l'autre la pile du thermomultiplicateur ouverte du côté de l'écran. Si le rayonnement calorifique obscur et invisible de notre source se propage en ligne droite, comme les rayons lumineux, il faudra que le *maximum* d'action développée sur le thermoscope se montre lorsque les centres de la pile, de l'ouverture, et de la source calorifique se trouveront sur une même ligne droite, qui pourra être perpendiculaire ou oblique à la surface de l'écran. Mais si l'on retire graduellement la source ou la pile hors de cet alignement, les signes calorifiques devront diminuer avec rapidité et disparaître complétement, lorsque le corps thermoscopique ne pourra plus recevoir aucun rayon de chaleur; et c'est aussi ce que l'on observe, car l'action ne se manifeste avec force que dans le cas de l'alignement et manque tout-à-fait à l'endroit où le corps rayonnant, vu de la position qu'occupe la pile thermoscopique, s'éclipse derrière les bords

de l'ouverture. L'alignement de la source, de l'ouverture et de la pile s'estime aisément à l'œil. Cependant l'expérience devient beaucoup plus frappante si l'on fait passer un fil à travers l'ouverture de l'écran, et si l'on détermine les positions que doivent occuper la source et la pile, en tenant ce fil tendu horizontalement dans une direction, tantôt normale, tantôt oblique à l'écran. Alors, en poussant tant soit peu l'un ou l'autre appareil hors de la direction marquée par le fil, on voit l'index revenir exactement au zéro, malgré le soin que l'on a pris de maintenir constamment l'axe de la pile dirigé vers l'ouverture de l'écran.

Lorsqu'un rayon solaire pénètre dans l'intérieur d'une chambre obscure, non seulement il se propage en ligne droite, comme il est aisé de l'apercevoir au moyen de la trace lumineuse qui accompagne le rayon, mais sa marche s'effectue d'une manière tout-à-fait indépendante de l'air interposé sur son passage, qui peut rester en repos ou en mouvement, sans que l'on observe pour cela aucun changement dans la force ou la direction de la lumière. En effet, si l'on note soigneusement la place occupée par l'image lumineuse que le rayon dessine sur les parois ou le parquet de la chambre, et si l'on observe son intensité et la translation lente qui lui est communiquée par la rotation de la terre, on trouve que le mouvement et la vivacité de cette image sont exactement les mêmes, soit qu'on agite vivement l'air interposé sur le passage de la trainée lumineuse, soit qu'on laisse le milieu ambiant dans le repos le plus absolu.

L'expérience devient encore plus frappante, si l'on fait pénétrer le rayon solaire dans la chambre obscure au moyen d'un héliostat; car alors le trait de lumière se trouvant soustrait à l'effet apparent de sa rotation diurne, il est très-

facile de vérifier avec la plus grande exactitude que l'agitation de l'air n'altère ni sa position, ni son intensité.

Scheele avait déjà conclu des observations les plus familières que les rayons de chaleur possèdent aussi la propriété d'être insensibles aux mouvements de l'air. En effet le calorique qui part du feu allumé dans l'intérieur d'un poêle, disait-il, s'élance comme un torrent hors de l'ouverture, traverse l'air environnant, et sa tendance à se mouvoir en ligne droite est si forte, que sa direction n'est point changée par le courant d'air qui accourt constamment vers la bouche du poêle pour remplacer celui qui s'échappe en vertu de la dilatation produite par la chaleur intérieure. En vain même agite-t-on fortement l'air situé devant la porte du poêle, la marche des rayons du calorique n'en est pas plus dérangée que celle des rayons solaires (*).

Il est peut-être inutile de remarquer que ces observations, tirées d'un exemple dans lequel la chaleur se trouve mêlée avec la lumière, et appuyées au seul témoignage des sens, ne sauraient suffire pour admettre l'invariabilité de direction et de force des rayons calorifiques malgré l'agitation de l'air ambiant.

Mais grâce au thermomultiplicateur, la constance dans la marche et l'intensité des rayons de chaleur, à travers les couches agitées de l'air peut se démontrer aujourd'hui avec la plus grande exactitude. Pour cela, on fait d'abord arriver la chaleur rayonnante obscure de la source à 400 degrés sur la pile, et on laisse à celle-ci le temps nécessaire pour produire la déviation stable de l'index rhéométrique. Ensuite au moyen d'un soufflet, on dirige un courant d'air

(*) *Scheele — Traite de l'air et du feu. Paris* 1781 *p.* 118.

sur le passage de la radiation, et l'on voit l'aiguille du galvanomètre se maintenir exactement dans sa position d'équilibre, comme si le milieu ambiant était tout à fait calme.

Nous croyons presque inutile d'ajouter que l'expérience réussit tout aussi bien avec la flamme et le platine incandescent qu'avec la lame métallique chauffée à 400 degrés.

Dans tous les cas, comme l'agitation produite par le soufflet pourrait affecter la source ou la pile en amenant une plus grande quantité d'air au contact de ces corps, il est très-convenable, pour la bonne réussite de l'expérience, de les placer dans l'intérieur de deux enceintes cylindriques percées l'une en face de l'autre d'un trou égal à l'ouverture de la pile. Alors le courant n'a qu'une chance beaucoup plus faible de troubler l'air qui environne les deux appareils, et l'aiguille rhéométrique reste sensiblement immobile pendant l'expérience.

Après ce que nous avons vu au commencement de ce chapitre, l'inaptitude de l'air à altérer la marche ou l'intensité des radiations calorifiques ne saurait nous étonner. Effectivement, puisque de telles radiations se propagent dans le vide, il faut bien que leur mode de transmission soit indépendant de l'état où se trouve l'air atmosphérique, c'est-à-dire, que le repos et le mouvement de ce fluide soient tout-à-fait indifférents aux rayons de chaleur qui le traversent. On exprime le fait d'une manière conventionnelle en disant que la chaleur rayonnante se transmet *immédiatement* ou par *voie immédiate ;* et cela, afin de distinguer cette transmission de la propagation ordinaire du calorique, qui a toujours lieu *médiatement,* c'est-à-dire *au moyen des milieux,* ou *substances pondérables* qui sont en contact avec la source.

La chaleur rayonnante, lumineuse ou obscure, jouit encore d'une troisième propriété qui est, tout aussi bien que les deux précédentes, un attribut de la lumière, savoir : *l'instantanéité de transmission* à travers une étendue quelconque d'air atmosphérique.

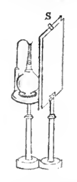
On connaît l'expérience du coup de fusil ou de canon tiré d'abord tout près, ensuite à une distance considérable d'un observateur. Dans le premier cas, l'observateur perçoit en même temps la lumière et le bruit produit par la conflagration de la poudre ; dans le second, la lumière lui arrive plutôt que le bruit, et cela parce que le son ne se propage pas *immédiatement* et instantanément comme la lumière, mais par la *voie médiate* de l'air, qui exige un intervalle de temps très-appréciable. Il ne saurait en être ainsi des rayons calorifiques, car nous venons de voir que leur propagation est *immédiate*, et tout aussi rapide que celle des rayons lumineux.

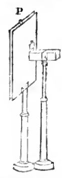
Pour montrer l'instantanéité de la transmission lumineuse sur une étendue considérable du globe terrestre, on fournit deux observateurs de montres à secondes, et de tout ce qui est nécessaire pour produire un signal visible à une grande distance. Ainsi munis, les observateurs vont se poster sur des hauteurs fort éloignées entre elles, après s'être entendus sur le mode de produire et d'observer alternativement le signal arrêté; et ils notent exactement les époques des signaux donnés et reçus. L'expérience finie, on se réunit, on compare les montres et les observations, et l'on ne trouve absolument aucune différence appréciable entre l'instant où le signal a été transmis, et celui où il a été perçu à l'autre extrémité.

Nous ne pouvons suivre la même marche pour la cha-

leur. En effet malgré le grand perfectionnement qu'ont reçu en dernier lieu nos moyens thermoscopiques, nous sommes encore loin d'avoir atteint dans les instruments relatifs à la chaleur rayonnante la prodigieuse sensibilité que l'œil possède à l'égard de la lumière. Il faut donc avoir recours à d'autres méthodes pour mesurer la vitesse de cet agent. Voici le procédé qui nous paraît préférable dans l'état actuel de la science.

Imaginons la pile du thermomultiplicateur couverte par un double écran en métal, et la source de chaleur, plus





ou moins éloignée, abritée, elle aussi, derrière un écran composé de deux ou trois lames parallèles, afin que celle tournée vers la pile puisse se conserver plus aisément à la température ambiante. Pour plus de clarté nous appellerons P le premier écran et S le second : il est bien entendu que P se trouve tout près de la pile et S tout près de la source. En les remettant après qu'on les a ôtés pour établir la communication rayonnante, il faut toujours les imaginer de nouveau dans les conditions primitives. Il est inutile d'ajouter que la pile reste constamment ouverte et tournée vers la source.

Cela posé, ôtons S; le rayonnement de la source frappera l'écran P et se trouvera tout près de la pile thermoscopique. Lorsque l'index du rhéomètre sera bien tranquille sur le zéro du cadran, on ôtera P; le rayonnement franchira le tout petit intervalle compris entre cet écran et la pile ; l'aiguille indicatrice du rhéomètre se mettra en marche, et décrira son *arc d'impulsion primitive* ou excursion initiale que l'on peut observer avec beaucoup de précision, parce que l'index, arrivé à son extrémité, s'arrête un instant pour rebrousser chemin. On notera, avec une bonne montre à secondes, le temps écoulé depuis l'instant où l'on établit la communication calorifique, jusqu'à celui où l'index arrive au bout de sa course; après quoi l'on remettra en place l'écran de la source S, en laissant la pile découverte et débarrassée de son écran P. Lorsque l'index rhéométrique sera fixé sur le zéro, on ôtera S. Alors les rayons calorifiques mettront de nouveau en mouvement l'index du rhéomètre, *après avoir franchi l'espace compris entre la source et la surface antérieure de la pile où ils seront absorbés*. On observera, comme tantôt, le temps nécessaire à l'index pour arriver à l'extrémité de *l'arc de déviation initiale*, en partant de l'instant où l'on établit la communication calorifique. Or, si l'on répète cette expérience un grand nombre de fois, et si l'on compare les moyennes des deux séries d'observations, on les trouve parfaitement égales. Donc le temps que la radiation calorifique emploie à traverser l'intervalle compris entre la source et la pile est tout à fait insensible.

En appliquant cette méthode à la chaleur vibrée par un four à verre plein de matière incandescente, dont le rayonnement parvenait sur la pile en passant par deux ouver-

tures, l'une desquelles était dans la verrerie, et l'autre dans la maison éloignée où l'on avait établi le thermomultiplicateur, j'ai pu m'assurer par ce moyen de l'instantanéité de la transmission calorifique pour une distance de 357 pieds.

Quoiqu'une semblable étendue soit fort peu de chose, relativement à l'énorme vitesse du rayonnement calorifique, en la voyant parcourue dans un instant tout à fait inappréciable, on en tire cependant une preuve évidente de l'énorme différence qui existe, sous le rapport de la vitesse, entre la propagation de la chaleur rayonnante et celle de la chaleur de conductibilité.

Nous verrons dans l'un des chapitres suivants la démonstration expérimentale d'un fait extrêmement important, d'où il résulte que la vitesse de propagation du rayonnement calorifique est, selon toute probabilité, égale à celle de la lumière.

Résumons-nous : la chaleur rayonnante se transmet *en ligne droite, immédiatement, et instantanément.* Ces trois caractères sont, pour ainsi dire, opposés à ceux de la chaleur ordinaire, qui parcourt les corps dans toutes les directions droites ou courbes, qui se transmet médiatement de l'une à l'autre couche de matière pondérable, et passe par conséquent avec une vitesse et une intensité plus ou moins grandes, selon que ces couches sont dans l'état de mouvement ou de repos; mais qui marche toujours avec une lenteur excessive par rapport à la chaleur rayonnante.

Les trois propriétés fondamentales de la radiation calorifique, que nous venons d'étudier une à une avec tous les détails réclamés par leur extrême importance, se démontrent presque simultanément dans les cours publics au moyen

des *miroirs conjugués*, qui semblent avoir été employés pour la première fois à un tel but par Pictet et Saussure.

On dispose à une distance de plusieurs pieds deux miroirs sphériques de cuivre jaune bien poli, et on les tourne de manière à ce que leurs concavités se regardent, et que leurs axes soient placés sur la même ligne horizontale. Alors on fixe un boulet de fer chauffé au-dessous de l'incandescence, ou un matras plein d'eau bouillante, dans le foyer de l'un des miroirs, et l'on place la boule active d'un thermoscope de Rumford, ou d'un thermomètre différentiel de Leslie, dans le foyer du miroir opposé, en ayant soin que la boule compensatrice soit sur l'axe des miroirs, ou latéralement, de manière à se trouver plus loin du corps chaud que la boule focale : l'instrument thermoscopique marque aussitôt plusieurs degrés de chaleur.

Comme la boule compensatrice est pour le moins aussi rapprochée de la source calorifique que la boule active, il est clair que le phénomène observé ne provient pas de *l'action directe* de la source, mais de la réflexion des rayons, qui tombent d'abord en divergeant sur le miroir le plus rapproché, sont renvoyés de là parallèlement à l'axe, arrivent sur le miroir opposé, et se concentrent sur la boule focale du thermoscope.

Le rayonnement étant intercepté tout près de la source au moyen d'un écran, que l'on ôte ensuite de nouveau lorsque l'index thermoscopique est revenu à sa position initiale, la colonne liquide se met aussitôt en marche : la chaleur parcourt donc instantanément la distance comprise entre les deux miroirs.

Enfin, lorsque l'action est bien prononcée sur le thermoscope, on agite l'air entre les deux miroirs ; et comme la

marche ascendante ou descendante de l'index liquide ne paraît souffrir aucune altération, on en conclut que la propagation des rayons est immédiate.

Cette expérience a d'abord l'inconvénient de mettre en jeu un élément inutile, la réflexion, pour en déduire la direction rectiligne de la propagation, direction qui devrait être démontrée avant toute autre propriété de la chaleur rayonnante.

Si l'on croyait avantageux de prouver, simultanément, et la direction rectiligne et la loi de la réflexion, au moins faudrait-il employer dans la démonstration une surface plane, qui recevrait sous une certaine inclinaison le rayonnement de la source, et le renverrait ensuite sur le thermoscope convenablement placé au-delà de la normale. On verrait ainsi en même temps, et la marche rectiligne du calorique rayonnant, et la loi suivant laquelle ses radiations se réfléchissent sur les corps polis; l'expérience serait ainsi, sans aucun doute, beaucoup plus simple que celle des miroirs sphériques, dans lesquels les propriétés des foyers conduisent à l'égalité des angles de réflexion et d'incidence par un détour assez compliqué.

La *propagation immédiate* n'apparaît pas non plus d'une manière bien nette lorsqu'on agite l'air interposé entre les deux miroirs, parce que le thermoscope monte ou descend pendant cette opération, selon que la communication calorifique des deux miroirs se trouve établie depuis un temps plus ou moins long.

Enfin la partie de l'expérience relative à *l'instantanéité de la transmission* n'est nullement concluante, car en observant alternativement l'index liquide, on trouve qu'il se passe un intervalle de temps, bien court à la vérité, mais

très-appréciable, entre le moment où l'on ôte l'écran, et celui où commence l'indication thermoscopique; intervalle dérivant, comme nous l'avons déjà remarqué, de l'enveloppe de verre qui doit être traversée avant que la chaleur ne se communique au fluide interne.

On peut toutefois corriger les deux derniers défauts de l'expérience en substituant au boulet de fer chauffé au-dessous de l'incandescence, ou au matras d'eau bouillante, notre lame noircie et maintenue à une température constante par le contact postérieur de la flamme alcoolique, que l'on tourne du côté opposé au réflecteur, en ayant soin de couvrir la flamme par un double écran métallique qui ne dépasse guère l'étendue de la lame. Alors pour démontrer l'instantanéité de la transmission, il n'y a qu'à employer la méthode expérimentale ci-dessus mentionnée, qui consiste, à intercepter successivement la radiation calorifique, d'abord tout près du thermoscope, ensuite tout près de la source de chaleur, à observer pour l'un et l'autre cas l'effet obtenu sur l'instrument dans un temps donné, et à montrer que ces deux effets sont égaux.

Il est vrai que les thermactinomètres de dilatation ne présentent pas dans leurs indications, la période si nette et si facile à saisir de *l'excursion primitive* donnée par les thermactinomètres électro-magnétiques; mais on peut obtenir des données assez précises en observant les effets produits dans un certain intervalle de temps.

Ainsi conduite, l'expérience offre un avantage incontestable sur la méthode adoptée, qui ne donne pas la preuve du *temps inappréciable* que les rayons emploient à se transmettre de l'une à l'autre distance, puisque nous venons de dire qu'en observant attentivement le thermoscope, on

aperçoit un intervalle sensible entre l'instant où l'on ôte l'écran, et celui où l'instrument commence à donner quelques indices de chaleur.

Quant à la démonstration de la *propagation immédiate*, on l'obtient aussi d'une manière beaucoup plus nette au moyen de la source constante de chaleur obscure ; car, après avoir attendu que le thermoscope se soit équilibré avec le rayonnement réfléchi de la source, on dirige, comme dans l'expérience précédente, le courant d'air excité par le soufflet, entre les deux miroirs. On voit alors l'index se maintenir parfaitement tranquille à la hauteur où il est arrivé par l'action du rayonnement constant qui continue à traverser l'espace interposé entre les deux miroirs; ce qui démontre l'indépendance entre la transmission rayonnante de la chaleur et l'air atmosphérique beaucoup mieux que dans le cas où l'on voit le thermoscope monter ou descendre pendant l'expérience.

La propagation rectiligne et immédiate de la chaleur rayonnante une fois reconnue on en déduit que l'intensité de la radiation doit décroître en raison du carré de la distance à la source calorifique.

Cela se démontre en répétant mot pour mot, à l'égard de la chaleur, ce que l'on dit depuis longtems en optique relativement à l'affaiblissement que l'intensité de la lumière éprouve, lorsqu'on s'éloigne du point éclairant.

Si, avec les rayons 1, 2, 3, 4, 5, etc., on décrit par la pensée une série de sphères concentriques autour d'un point chaud, on a 1, 4, 9, 16, 25, etc. pour les surfaces de ces sphères.

Or, les mêmes rayons de chaleur qui occupent toute l'étendue de la première surface idéale se répandront suc-

cessivement sur les surfaces suivantes, et deviendront par conséquent quatre fois plus rares à une distance double, neuf fois plus rares à une distance triple, seize fois plus rares à une distance quadruple, et ainsi de suite ; en sorte que l'énergie de l'échauffement suivra la loi énoncée du carré inverse de la distance.

Cependant il faut avouer que par rapport à la lumière, les résultats des expériences de Lambert, de Bouguer, et de Rumford, fournis par des appareils photométriques dont le principe est plus ou moins douteux, constituent de simples essais dépourvus de la précision exigée par l'état actuel de la science ; et qu'une bonne détermination expérimentale des degrés d'illumination produits à diverses distances du corps éclairant est encore à désirer (*).

Que dire après cela de la loi relative au rayonnement calorifique, lorsqu'on réfléchit qu'un physicien aussi habile que Leslie, après de nombreuses recherches pour connaître, au moyen de l'expérience, le rapport qui existe entre les deux éléments de cette loi, arriva à cette conclusion que l'intensité de la chaleur est proportionnelle à la simple distance du corps chaud !

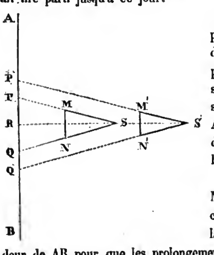
Mais l'étonnement cessera si l'on veut bien considérer que la théorie suppose la surface rayonnante réduite à un seul point, et le corps thermoscopique d'une grande petitesse par rapport à l'éloignement de ce point; tandis que l'on emploie en réalité pour l'un et l'autre but des objets d'un volume énorme relativement aux petites distances dans

(*) *Les expériences de Lambert sont décrites dans sa* Photometria, *celles de Bouguer dans son ouvrage* Sur la dégradation de la lumière, *et celles de Rumford dans les* Philosophical Transactions for the year 1794.

lesquelles le rayonnement donne des effets appréciables. Alors l'intervalle compris entre l'appareil thermoscopique ou photométrique et le corps chaud ou lumineux n'est plus susceptible d'aucune évaluation précise.

Pour mettre l'expérience bien d'accord avec la théorie il faudrait donc une méthode, dont l'exactitude ne fût point altérée par les conditions physiques indispensables à ce genre de recherches ; c'est-à-dire, qu'il faudrait pouvoir vérifier la loi des carrés avec des corps d'une certaine étendue, et sans qu'il fût nécessaire de mesurer les distances interposées entre chaque point de la surface rayonnante, et chaque point de la surface destinée à recueillir l'effet du rayonnement.

Or, une telle méthode existe à l'égard de la radiation calorifique ; les moyens de l'appliquer sont simples, faciles, infaillibles. Il est vraiment singulier que personne n'en ait tiré parti jusqu'à ce jour.



Imaginons un récipient conique M S N, dont l'intérieur, incapable de réflexion, soit tourné vers une surface verticale fixe A B, échauffée au-dessus du milieu ambiant.

Supposons l'angle M S N au sommet du cône, assez petit relativement à la grandeur de AB pour que les prolongements S M P, S N Q,

S' M' P', S' N' Q' des parois du cône rencontrent toujours la surface chaude, quelle que soit la distance interposée entre cette surface et le cône. Supposons enfin le corps thermoscopique réduit à un seul point et fixé au sommet interne du cône, dont l'axe se maintienne constamment parallèle à lui-même dans les positions qui peuvent lui être communiquées pendant l'expérience.

Il est clair que, si l'intensité de la radiation suit réellement la loi inverse du carré de la distance, on pourra éloigner à volonté le thermoscope du corps échauffé, sans que l'action calorifique exercée sur le point sensible éprouve aucune altération ; car l'étendue circulaire de la surface qui pourra rayonner sur ce point augmentera en raison directe du carré de la distance, sans varier pour cela l'inclinaison du rayonnement calorifique, tandis que l'intensité de la radiation diminuera dans le même rapport, et compensera ainsi exactement l'effet dérivant de la plus grande étendue du corps chaud mise en communication avec le point thermoscopique.

Dans ces conditions de l'expérience, la constance de l'indication montrerait donc que le rayonnement de la surface décroît en raison du carré de la distance, sans qu'il fût nécessaire de mesurer les intervalles compris entre le corps rayonnant et le point sensible.

Ce que nous disons d'un seul point s'applique évidemment à une série quelconque de ces mêmes points fixés au fond d'un tube sans réflexion intérieure. En effet, chacun de ces points formera avec les rayons vibrés sur lui, à travers l'ouverture du tube, le cône à base variable, dont il a été question tantôt, et *verra*, pour ainsi dire, *sous un angle constant* une étendue de la surface échauf-

fée proportionnelle au carré de la distance. La quantité de chaleur qu'il recevra sera donc toujours la même quel que soit son éloignement de la surface rayonnante, et l'instrument, qui donne la somme de ces quantités, marquera toujours le même degré.

Maintenant il est facile de voir que la pile thermoscopique se trouve exactement dans les conditions que nous venons d'examiner ! Il n'y aura donc qu'à enlever, moyennant une doublure de papier ou de velours noir, le pouvoir réflecteur de l'appendice de cuivre, et à mettre l'instrument, ainsi modifié, en présence d'un vase rempli d'eau chaude pour vérifier si nos prévisions sont sanctionnées par l'expérience : et c'est aussi ce qui arrive avec une précision admirable.

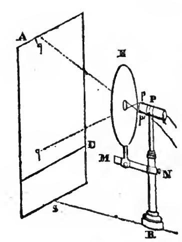
Si l'on possède un excellent thermomultiplicateur, un récipient rempli d'eau à 30 ou 40 degrés, ayant une paroi, carrée ou circulaire, de 4 à 5 décimètres, suffit pour obtenir l'invariabilité d'une déviation rhéométrique de 25 à 30 degrés dans toute l'étendue d'un intervalle d'un demi-mètre. Lorsque l'instrument employé possède une sensibilité moyenne, il faut avoir recours à l'eau bouillante ; et, dans ce cas, l'appendice noirci s'échauffe assez pour agir quelque peu sur le corps thermoscopique. Cela n'aurait aucun inconvénient si la surface rayonnante était indéfinie, car chaque point de la *doublure noire* recevrait, par l'ouverture, un cône de rayons dont la base s'appuyerait constamment sur la surface rayonnante, et l'échauffement du point serait toujours le même. Mais, comme la paroi du vase est limitée, on conçoit que, pour les points de la doublure fort rapprochés de l'extrémité du tube, la base du faisceau conique débordera en partie hors de la surface rayonnante,

dès l'instant où l'on éloignera la pile du vase, ce qui rendra nécessairement moindre l'action due à leur échauffement.

Avec les thermomultiplicateurs ordinaires, à appendices intérieurement noircis, il faudrait donc opérer sur des surfaces très-grandes pour obtenir un résultat exact. D'autre part, l'étendue de la paroi rayonnante ne suppléerait pas à la nécessité d'une haute température. Cependant, si l'on ôte la substance non métallique placée à l'intérieur de l'appendice, l'instrument, remis dans son état naturel, possède toujours assez de sensibilité pour permettre d'opérer avec succès sur le rayonnement d'une surface de grandeur limitée, élevée à une température excessivement faible.

Mais l'objection soulevée tantôt, à propos de l'échauffement variable des points noirs situés près de l'ouverture, se reproduit ici à l'égard du pouvoir réflecteur.

En effet, quelle que soit l'action que la réflexion d'un point intérieur de l'appendice exerce sur le corps thermoscopique, il est évident qu'elle ne changera point, tant que les communications, directes ou indirectes, de tous les points réflecteurs avec la surface chaude, resteront les mêmes; car le nombre des rayons qui, dans une position quelconque de l'appareil, parviendront, à travers l'ouverture de l'appendice, sur chacun des points réflecteurs, sera toujours proportionnel au carré de la distance de la paroi échauffée. Or, à moins que cette paroi ne soit immensément étendue, si l'on s'éloigne à une certaine distance de la surface rayonnante, les points de l'enveloppe situés près de l'ouverture du tube commenceront à recevoir le rayonnement des objets environnants, et à produire une variation plus ou moins grande, selon la différence de température existante entre ces objets et la surface échauffée,



Pour retenir l'action dans les limites convenables, on se procurera un écran en métal percé d'une ouverture centrale de 12 à 15 millimètres de diamètre. On rendra cet écran mobile le long d'une pièce additionnelle M N perpendiculaire au pied NR de la pile P; et après avoir éloigné le tout à la plus grande distance possible, on arrangera l'écran de manière que les lignes p q, p'q', conduites par les bords opposés de l'ouverture et de l'enveloppe thermoscopique ne dépassent pas les limites de la surface échauffée AB. Cela fait, on poussera l'appareil le long d'une ligne RS normale à la surface du vase; et alors la déviation du galvanomètre, produite par le rayonnement calorifique, se maintiendra exactement invariable jusqu'à la moindre distance possible.

Avec un vase de 60 à 80 centimètres de surface latérale, rempli d'eau chaude, on obtiendra ainsi la constance de l'effet sous une variation de 50 à 60 centimètres de distance. Il est évident que l'on pourra étendre les limites de l'expérience d'autant plus que les dimensions du vase seront plus considérables.

Cependant, comme les frais nécessaires pour se procurer des récipients de fortes dimensions, comme la difficulté de les manier ou de les maintenir à une température constante, détermineraient le plus grand nombre des observa-

teurs à négliger la vérification d'un fait, tellement important pour la théorie de la chaleur rayonnante qu'il devrait être constaté, non seulement dans le cabinet du professeur de physique, mais aussi devant les nombreuses réunions d'élèves qui apprennent les éléments de cette science, je vais indiquer une manière très-simple et très-économique de répéter l'expérience sur une grande échelle.

A cet effet, il n'y a qu'à prendre comme source calorifique l'une des parois d'une vaste salle. L'étendue de la surface rayonnante permet alors de placer l'écran percé à une fort petite distance de la pile; ce qui augmente nécessairement la sensibilité de l'appareil et rend les observations possibles par l'action d'un faible excès de température entre le corps chaud et le corps thermoscopiqne.

Nous avons vu que la chaleur des murs est ordinairement assez différente de celle de l'air, et des instruments qui s'y trouvent plongés, pour donner des déviations galvanométriques très-appréciables, lorsqu'on tourne vers eux la pile du thermomultiplicateur.

Si, à cause de la disposition particulière de l'appartement, ou par tout autre motif, la déviation ne se montrait point malgré le bon état de l'instrument, on la produirait en fermant pendant quelque temps les croisées de la salle destinée aux expériences et en rafraîchissant l'air intérieur par l'évaporation de l'eau ou de l'alcool ; car la pile acquiert bientôt la température de l'air refroidi, tandis que les murs conservent pendant longtemps le degré de chaleur initiale, en vertu de leur grande masse.

Le refroidissement de la pile et du milieu qui l'entoure s'obtient aussi sans aucune espèce d'embarras, lorsqu'une pluie d'orage vient tout-à-coup rafraîchir l'atmosphère, ou

lorsqu'après une nuit sereine, et avant le lever du soleil, on laisse entrer dans l'appartement, soigneusement fermé jusqu'alors, l'air frais du dehors.

On est sûr, enfin, d'avoir une action calorifique très-appréciable aux thermomultiplicateurs les plus paresseux, en opérant le soir sur un mur qui a reçu pendant une bonne partie de la journée l'action directe des rayons solaires.

De toute manière, lorsqu'on aura obtenu, naturellement ou artificiellement, l'action cherchée, il faudra promener l'extrémité ouverte du tube thermoscopique tout près des diverses parties du mur destiné à l'expérience, afin de s'assurer qu'elles possèdent toutes le même excès de chaleur sur la température du milieu ambiant. Cela fait, on arrêtera l'écran percé à la distance convenable pour produire une forte déviation au galvanomètre sans rendre la pile accessible au rayonnement des corps situés hors du mur qui sert de source calorifique; puis on rapprochera tout doucement l'appareil du mur, en ayant bien soin de maintenir constamment son axe dans la même direction; et l'on verra que pendant le transport, la déviation galvanométrique ne subit aucun changement.

Si l'index bougeait, cela proviendrait de quelques bouffées d'air d'une température anomale, qui trouveraient moyen de s'introduire jusqu'à la chaîne thermo-électrique; et alors il suffirait d'attendre quelque temps pour voir la déviation reprendre sa valeur primitive. Il se pourrait encore que la perturbation de l'index dérivât du rayonnement parti de l'observateur ou de tout autre objet plus ou moins chaud que la pile; et, dans ce cas, on verrait l'aiguille rhéométrique reprendre sa fixité moyennant quelques écrans convenablement disposés.

Ces petits détails pratiques ne sembleront peut-être pas déplacés, si l'on veut bien considérer la haute portée des conséquences que la vérification expérimentale du principe en question aura probablement dévoilées à la sagacité du lecteur.

L'expérience ayant démontré que l'intensité de la radiation calorifique suit exactement le rapport indiqué d'avance par la théorie, il en résulte nécessairement : 1.° que l'instrument thermoscopique employé est exact; 2.° qu'entre les limites de l'observation, c'est-à-dire, pour un intervalle de cinq à six mètres, l'air n'exerce aucune absorption sensible sur le rayonnement des corps chauds.

On se persuadera aisément de la vérité de la dernière conclusion en considérant, que s'il y avait absorption, toutes les couches d'air interposées entre la source et le corps thermoscopique agiraient avec la même intensité, ou bien les couches qui sont les plus rapprochés de la source absorberaient davantage; et, dans l'un et l'autre cas, la loi des carrés ne pourrait avoir lieu.

Quant à la première conséquence, elle fournit aux observateurs le moyen d'éviter les expériences assez longues et délicates que nous avons décrites au chapitre 1.er §. 5, et montre avec la dernière évidence que le thermomultiplicateur donne les véritables rapports d'énergie des rayonments calorifiques. Je dirai plus : l'exactitude des mesures prises au moyen du thermomultiplicateur n'est *véritablement démontrée* que par la vérification de la loi du décroissement de la chaleur, en raison des carrés des distances à la source rayonnante.

En effet, comme les physiciens n'ont pas encore trouvé le moyen de mettre hors de doute que la marche du ther-

momètre au-dessus de la température ambiante est proportionnelle à la quantité de chaleur employée, l'accord entre les indications des deux instruments ne prouve pas, en fin de compte, que le thermomultiplicateur donne les vrais rapports d'intensité des rayons calorifiques. Un tel accord montre uniquement, qu'en substituant le thermomultiplicateur aux appareils thermométriques à mercure ou à gaz, et vice versâ, on arrive aux mêmes conséquences ; mais il ne peut guère nous donner la certitude qu'un rayon calorifique, d'une intensité double ou triple de celui que l'on prend pour unité, développe dans le thermomultiplicateur des forces déviatrices deux ou trois fois plus grandes. Cette certitude, je le répète, ne nous est définitivement acquise que par la vérification de la loi des carrés.

Et il ne faut pas croire que le manque de comparabilité des mesures, fournies par différents thermomultiplicateurs, nuise le moins du monde à la précision des résultats ; car nous répéterons ici ce que nous disions au commencement du premier chapitre: la sensibilité plus ou moins grande de l'appareil forcera l'observateur à s'éloigner plus ou moins de la source de chaleur, afin de rencontrer une action d'une intensité convenable ; mais il trouvera partout la même composition dans le flux rayonnant, et le thermomultiplicateur lui donnera toujours les mêmes rapports entre les intensités des parties aliquotes ou élémentaires du rayonnement direct.

En jetant un coup d'œil rétrospectif sur les diverses questions thermométriques traitées dans le premier chapitre, nous voyons d'abord qu'une application, mal entendue, de certaines comparaisons thermométriques et thermo-électriques évaluées par la déviation des aiguilles aimantées,

induisit quelques esprits inquiets à rejeter comme inexactes les mesures des radiations prises au moyen du thermomultiplicateur. La proportionnalité entre les courants thermo-électriques employés dans cet appareil et les petites fractions du degré thermométrique, qui leur donnent naissance, nous montra qu'une semblable induction était démentie par l'expérience. Alors l'exactitude du thermomultiplicateur se trouva justifiée pour ainsi dire, moyennant la marche concordante de cet instrument avec les indications du thermoscope ou thermomètre de dilatation, que l'on croyait seul capable d'indiquer les valeurs relatives des flux calorifiques. Maintenant nous voilà arrivés beaucoup plus loin, car la nécessité du parallélisme de marche des deux appareils se trouve écartée, et *l'exactitude des rapports assignés aux rayonnements calorifiques par le thermomultiplicateur parfaitement démontrée*, malgré les difficultés que l'on rencontre dans la comparaison des échelles appartenant à deux thermomultiplicateurs différents. Tandis que, si le thermomètre ne laisse plus rien à désirer du côté de la comparabilité, les quantités relatives de chaleur d'où dérivent les indications de cet instrument sont complétement inconnues.

CHAPITRE IV.

TRANSMISSION DE LA CHALEUR RAYONNANTE PAR LES MILIEUX SOLIDES ET LIQUIDES.

Notions historiques. Remarques sur les découvertes de Delaroche. Moyen d'obtenir la mesure de la chaleur immédiatement transmise sans aucun mélange des rayons provenant de l'échauffement du milieu. Description d'un appareil propre à toutes sortes de recherches sur le rayonnement calorifique. Échelles de *diathermasie*. Transmission rayonnante des corps opaques. Quantités de chaleur qui parviennent à franchir diverses épaisseurs d'un même milieu en conservant leur forme rayonnante. La thermochrôse des corps diaphanes résulte avec la dernière évidence des expériences de transmission successive; elle manque complétement dans le sel gemme et varie de l'un à l'autre milieu. Action des couleurs sur la transmission calorifique. Diathermasie et thermochrôse du sel gemme enfumé. Le rayonnement des sources lumineuses terrestres contient, comme le rayonnement solaire, une grande quantité de radiations calorifiques obscures. La chaleur rayonnée par les corps chauffés au-dessous de l'incandescence se compose de radiations élémentaires différentes. Toutes les propriétés que l'étude des phénomènes de transmission révèle dans la chaleur rayonnante s'expliquent heureusement par le principe de l'identité des deux agents d'où dérivent les rayons lumineux et les rayons calorifiques.

§. 1.

Notions générales.

Après avoir vu les radiations de nos sources de chaleur se propager dans le vide et obéir exactement dans l'air atmosphérique aux lois que la lumière suit à l'égard des substances transparentes, on éprouve une bien grande surprise lorsqu'on s'aperçoit pour la première fois que presque toutes ces radiations calorifiques, obscures ou accompagnées d'un développement de lumière, s'éloignent considérablement de leur analogie avec les radiations lumineuses par rapport aux milieux diaphanes solides et liquides, et ne peuvent traverser, en conservant leur état rayonnant, une mince couche d'eau, de verre, de cristal de roche, et d'autres corps parfaitement limpides et incolores, qui laissent passer en grande abondance l'action calorifique de la lumière solaire.

Les premières expériences sur la propriété que possèdent les substances diaphanes, en général, d'intercepter la plus grande partie du rayonnement calorifique de nos sources terrestres, tout en se laissant aisément traverser par la chaleur solaire, paraissent dues à Mariotte. Ayant exposé au soleil un miroir concave métallique, et ayant observé que la chaleur concentrée au foyer ne perdait pas sensiblement de son intensité en traversant une lame de verre, ce physicien porta son appareil devant le feu d'une cheminée, et trouva qu'à une distance de cinq à six pieds, l'image réfléchie au foyer était d'une température insup-

portable à la main, lorsque les rayons s'y réunissaient librement; mais qu'en interposant la lame de verre, on n'avait plus aucune sensation de chaleur, quoique l'image conservât encore tout son éclat. Il en conclut que *la chaleur du feu terrestre ne passe point à travers le verre, ou bien qu'il y en passe très-peu* (*).

Schéele répéta la même expérience cent ans environ après Mariotte, mais il ne se tint pas dans la sage réserve de cet ingénieux physicien; car il assura que lors de l'interposition du verre *on n'avait pas la moindre chaleur* au foyer du miroir (**). L'inexactitude d'une telle assertion fut bientôt relevée par Pictet au moyen des miroirs conjugués que nous avons décrits dans le chapitre précédent. On interposa un carreau de verre bien transparent entre la radiation d'une bougie concentrée par le second miroir, et le thermomètre placé à son foyer; le mercure monta en quelques instants de plusieurs degrés. Il y eut encore élévation sensible de température lorsqu'on substitua à la bougie un matras rempli d'eau bouillante (***).

Quelques années plus tard W. Herschel entreprit sur le même sujet une série très-étendue d'expériences. Il n'eut recours à aucun artifice pour augmenter l'action des rayons de chaleur, et se contenta de mesurer directement l'effet calorifique en fixant le thermomètre à une très-petite distance du corps diaphane. Sa conclusion finale est bien

(*) *Mariotte.* Traité de la nature des couleurs. *Paris* 1686, deuxième *partie; à la fin de l'introduction de l'ouvrage.*

(**) *Schéele.* Traité de l'air et du feu. *Paris* 1781, § 56. *Cet ouvrage a été publié pour la première fois en* 1777. *Mariotte est mort en* 1683.

(***) *Pictet.* Essai sur le feu, §. 52 et suivants.

connue de tous ceux qui s'occupent de sciences physiques. Persuadé d'abord de la vérité du principe de l'identité, les différences qu'il remarqua entre le pouvoir échauffant et le pouvoir éclairant des radiations transmises par les verres colorés, le déterminèrent enfin à admettre que ces deux propriétes appartiennent à deux agents essentiellement distincts (*).

Mais on éleva des doutes sur l'exactitude des conséquences tirées de ces divers résultats. On objecta que la surface antérieure de la lame s'échauffe en présence du rayonnement incident; que la chaleur absorbée se transmet de couche en couche jusqu'à la surface postérieure, et que de là elle agit sur le thermomètre. Cette action, due à l'échauffement du corps interposé, pouvait donc produire, en tout ou en partie, les effets observés. Bref, on en vint au point de nier entièrement la transmission rayonnante de la chaleur terrestre par toute espèce de milieu solide ou liquide.

Pierre Prévost, de Genève, s'efforça de détruire cette opinion par un moyen très-ingénieux. Ayant fixé au tuyau d'une fontaine un ajutage de deux lames parallèles et obtenu ainsi une nappe d'eau de l'épaisseur d'environ un demi-millimètre, il plaça, d'un côté, un thermomètre à air, et de l'autre tantôt une bougie allumée, tantôt un fer chauffé au-dessous de l'incandescence : le thermomètre fournit dans plusieurs cas des signes évidents de chaleur transmise (**). Ici la lame traversée par la radiation se renouvelant sans

(*) *Philosophical Transaction of the R. S of London for the year* 1800.

(**) *P. Prévost. Mémoire sur la transmission du calorique à travers l'eau et autres substances. Journal de phys. de chim. etc. par Delamétherie, année* 1811.

cesse, il semblait difficile d'admettre la propagation de couche en couche.

Cependant on soutint que le calorique se transmettait par l'intermède des molécules pondérables beaucoup plus vite qu'on ne l'imaginait, et que pour des couches très-minces, une certaine quantité de chaleur pouvait fort bien parvenir ainsi au thermomètre, malgré le mouvement du liquide. La même objection fut opposée avec plus de raison à d'autres expériences dans lesquelles on employa, au lieu de la nappe libre, une toile métallique dont les mailles étaient occupées par des voilures d'une eau glutineuse, qui se renouvelait sans cesse par l'application d'un pinceau imbibé à la partie supérieure de l'appareil.

Ces tentatives sur la transmission calorifique des liquides n'allèrent pas plus loin, et l'attention du monde savant fut appelée de nouveau sur les corps solides par l'expérience de Maycok, d'où il résultait qu'une lame de verre soumise à la radiation d'un corps chaud laissait passer plus de chaleur étant à l'état naturel qu'après avoir été rendue opaque par une légère couche d'encre de Chine ou de noir de fumée (*).

Delaroche s'empara habilement de cette méthode et montra par des mesures fort soignées que la chaleur rayonnante d'un corps chauffé au-dessous de l'incandescence se transmettait dans une très-faible proportion à travers le verre; que cette portion n'était pas cependant constante, mais variable; d'abord nulle pour les rayons des corps chauffés au-dessous de 180 degrés, elle commençait à se montrer au-

(*) *Maycock. Remarks on prof. Leslie doctrine of radiant heat. A journal of natural phylosophy. chem and Not.* 6 *May and June* 1810.

delà, et augmentait avec la température de la source. Il trouva en outre que les rayons transmis par une lame de verre traversaient une seconde lame de la même substance beaucoup plus facilement que la chaleur directe (*).

La méthode employée par Delaroche n'était certes pas exempte d'objections, car on pouvait lui reprocher en premier lieu de considérer comme identiques les pouvoirs absorbant et émissif de deux substances aussi diverses que le verre et le noir de fumée ; supposition d'autant moins permise qu'on ne put décider alors, si les différences observées dans la transmission du même corps soumis à diverses sources de chaleur provenaient d'une action de surface, ou d'une force d'absorption intérieure. Une seconde objection à faire contre la méthode de Delaroche, c'est qu'on y considère l'échauffement du verre naturel comme constant et égal à celui de la lame noircie, pendant que cet échauffement peut varier, et varie en effet, avec la qualité de la chaleur incidente ; car le verre noirci absorbe constamment la presque totalité des rayons qui lui parviennent, tandis que dans son état de pureté, il doit en absorber d'autant plus qu'il en transmet une proportion moindre. Mais les objections furent passées sous silence, et les résultats furent admis comme des principes fondamentaux de la science du calorique rayonnant.

Nous verrons bientôt, au moyen de preuves expérimentales qui ne permettent plus le moindre doute, que les faits observés par Delaroche sont vrais, relativement aux lames de verre comprises entre certaines limites d'épaisseur (10).

(*) *Delaroche.* Observations sur le calorique rayonnant. *Journal de phys. de chim. etc. par Delamétherie. année* 1812.

(10) Les expériences décrites dans le § suivant montreront la

Toutefois en les adoptant à l'époque où ils furent annoncés, les physiciens commirent, non seulement la faute de considérer comme certaine une méthode contestable, mais encore celle d'en tirer une conséquence arbitraire, car ils appliquèrent aux milieux transparents en général ce que l'expérience n'avait encore vérifié que sur un seul corps solide. Il en résulta que la portée du phénomène fut totalement méconnue. Les propriétés particulières d'une substance diaphane furent attribuées à la classe entière et considérées comme des caractères essentiels de l'agent lui-même (11).

On crut alors que la radiation des corps chauffés au-des-

nécessité d'une telle restriction. En effet nous venons de dire ci-dessus que, d'après Delaroche, le rayonnement des sources dont la température est inférieure à 180 degrés *serait complétement intercepté par le verre.* Or, cela n'arrive que dans le cas où l'épaisseur des plaques surpasse un millimètre ; car, en prenant des lames plus minces, on trouve que le verre transmet, en quantité fort sensible, non seulement les radiations calorifiques des corps chauffés à 180 degrés, mais aussi celles des vases portés à 100 degrés par le simple contact de l'eau bouillante.

(11) Cette opinion ne se trouve peut-être nulle part plus nettement exprimée que dans la période suivante écrite sous l'impression récente des expériences de Delaroche, par un homme doué d'un esprit supérieur et profondément versé dans la théorie de la chaleur.

« Lorsque les corps sont assez échauffés pour répandre une très-
» vive lumière, une partie de leur chaleur rayonnante, mêlée à cette
» lumière peut traverser LES SOLIDES OU LES LIQUIDES TRANSPARENTS,
» et elle est sujette à la force qui produit la réfraction. La quan-
» tité de chaleur qui jouit de cette faculté est d'autant moindre que
» les corps sont moins enflammés; et elle est, pour ainsi dire, in-
» sensible pour les corps très-obscurs, quelque échauffés qu'ils soient.
» UNE LAME MINCE ET DIAPHANE intercepte presque toute la cha-
» leur directe qui sort d'une masse métallique ardente. » (*Fourier. Théorie analytique de la chaleur. Paris 1812, page 24*).

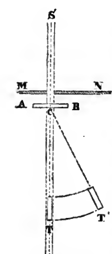
sous de 180 degrés était incapable de traverser et le verre, et toute autre espèce de matières transparentes solides ou liquides; de là l'idée que les rayons obscurs des sources à basse température étaient d'une nature toute différente des rayons lumineux. La proportion croissante de chaleur qui traversait *les corps diaphanes* à mesure que la température de la source approchait de l'incandescence suggéra ensuite la pensée que le calorique rayonnant *changeait peu à peu de nature et se transformait graduellement en lumière*. Quant à la diversité de transmission entre la chaleur franchissant directement le verre et celle qui, après avoir outrepassé une première lame de cette substance, en traverse une seconde, on fut assez généralement porté à l'attribuer à une espèce de polarisation, qui, dans cette circonstance, n'existe pas davantage que la prétendue distinction des deux agents calorifique et lumineux, comme on le verra par la suite.

Ces notions préliminaires étaient indispensables pour rappeller l'état où se trouvait la science, lorsque je repris en 1833 la question de la transmission calorifique rayonnante par les corps solides et liquides. Les expériences que j'offris alors au jugement du public reçurent plus tard divers développements. Nous allons les examiner avec tous les détails nécessaires, dans l'ordre le plus naturel, en y ajoutant plusieurs données nouvelles, et en retranchant tout ce qui tendrait à les compliquer inutilement.

On comprend d'abord que notre tâche sera rendue beaucoup plus facile par la connaissance des propriétés que nous avons soigneusement étudiées dans le chapitre précédent; car si la *transmission rayonnante* a lieu dans les corps solides et liquides, elle devra nécessairement satisfaire aux

lois qu'elle suit dans l'air. Pour montrer qu'une portion du rayonnement incident sur un corps solide se propage dans son intérieur, *en conservant l'état rayonnant*, il n'y aura donc qu'à s'assurer si elle suit la direction rectiligne, si elle traverse le corps par une voie indépendante des positions relatives de ses particules intérieures, et si elle passe instantanément de l'une à l'autre surface du milieu. Cependant nous aurons ici à combattre une difficulté qui manquait dans le cas de l'air, difficulté à laquelle j'ai fait plusieurs fois allusion, et que désormais nous ne devons plus perdre de vue, car elle est inhérente à la nature même des phénomènes qui formeront le but de toutes nos recherches ultérieures; cette difficulté est l'échauffement plus ou moins prononcé que les corps qui transmettent ou réfléchissent la chaleur ne manquent jamais de prendre sous l'action du rayonnement, direct ou indirect, de la source calorifique.

Quoique nous ayons déjà remarqué, au commencement de ce paragraphe, que la chaleur propre des corps, soumis à l'expérience, trouble les mesures thermoscopiques relatives à la transmission immédiate, au point de ne pouvoir convaincre d'erreur l'opinion qui voudrait que tout l'effet calorifique obtenu au-delà de la substance transparente, interposée entre la source et le thermoscope, dérive de cette espèce de chaleur, il nous faut reprendre de nouveau la même question afin de connaître d'une manière bien nette l'influence qu'elle exerce dans le phénomène formant l'objet de nos recherches actuelles; et voir ensuite par quel artifice on rend la mesure du rayonnement transmis totalement indépendante de l'action due à l'échauffement du milieu exploré.



Soit MN la section horizontale d'un écran métallique portant une petite ouverture derrière laquelle est située la lame diaphane ACB. L'axe de la radiation étant perpendiculaire à l'écran, le corps thermoscopique devra se trouver quelque part sur son prolongement; supposons-le en T. Supposons de plus qu'une portion de la radiation traverse immédiatement la lame AB. Les rayons émergents de cette lame continueront leur chemin au-delà en conservant la direction primitive, arriveront en T et produiront une certaine déviation sur le galvanomètre.

En attendant la lame AB s'échauffera par l'absorption d'une partie des rayons incidents, puis se mettra à rayonner dans tous les sens la chaleur acquise, ainsi que cela arrive pour un corps quelconque dont la température surpasse quelque peu celle du milieu ambiant. Une portion de cette *radiation secondaire* parviendra donc sur le corps thermoscopique, où elle s'ajoutera aux rayons immédiatement transmis de la source S ; le reste se répandra en divergeant tout autour de la lame. Mais veut-on connaître les valeurs relatives des deux radiations? Que l'on fasse décrire au corps thermoscopique un certain arc TT' autour de C, en le transportant ainsi de T en T', toujours tourné vers le centre de la lame. Dans cette dernière position le thermoscope étant entièrement dégagé du faisceau de chaleur provenant de la source, ne marquera plus que l'effet de la radiation due à l'échauffement de la lame. Et com-

me l'observation précédente représentait la somme de ces deux espèces de chaleur, on aura évidemment la mesnre des rayons transmis par la soustraction des deux actions thermoscopiques observées en T et T'.

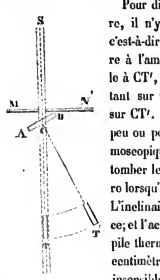
Remarqnons maintenant que la source calorifique S est beaucoup plus éloignée du thermoscope que la lame ACB transformée par l'absorption calorifique en source secondaire. En augmentant la distance de la pile à l'écran on diminue donc beaucoup plus l'intensité de la radiation secondaire que celle de la radiation principale. Si l'on réfléchit en outre que la température de la lame est, dans tous les cas, immensément plus faible que la température de la source, on concevra la possibilité de trouver, par un éloignement convenable et un appareil thermoscopique doué d'une grande délicatesse, telle position de la lame dans laquelle l'effet dû à l'échauffement sera tout-à-fait inappréciable, pendant que la radiation directe ou immédiatement transmise de la source principale affectera encore assez puissamment le thermoscope, pour donner une mesure très-apparente de son intensité. Or, la sensibilité du thermomultiplicateur est plus que suffisante pour atteindre ce dernier but.

En effet, si l'on produit 30 degrés de déviation sur le thermomètre, en vertu de la chaleur rayonnante tombant directement sur la pile, à travers une ouverture de même grandeur éloignée de cinq à six centimètres, une *lame quelconque* placée contre cette ouverture ne donne, en présence du rayonnement calorifique, aucune action appréciable; car l'index du rhéomètre, dévié par suite de la radiation directe ou transmise lorsque la pile est en T, tombe exactement au zéro si l'on transporte la pile en T'; ou bien il se conserve immobile sur le zéro, lors même que la pile

se trouve dans la première position, si la lame exposée au rayonnement calorifique est de nature à l'intercepter complètement.

Afin de ne laisser aucun nuage sur un fait si capital, nous irons au-devant d'une objection, qui pourrait venir à l'esprit du lecteur.

Lorsque le thermoscope est transporté en T', la ligne conduite au centre de la lame devient tant soit peu inclinée sur elle, et ne conserve plus sa direction normale comme dans le cas où l'instrument se trouve sur l'axe. Ne serait-il pas possible que cette inclinaison, si petite qu'elle soit, produisît un effet tel que le rayonnement propre de la lame ACB, inappréciable en T', fût sensible en T?



Pour dissiper tout soupçon de ce genre, il n'y a qu'à renverser les rôles, c'est-à-dire, tourner la lame de manière à l'amener dans une position normale à CT', et par conséquent inclinée autant sur CT qu'elle l'était tout-à-l'heure sur CT'. Ce changement n'altérera que peu ou point la valeur de l'action thermoscopique en T, et laissera toujours tomber les aiguilles du rhéomètre à zéro lorsqu'on transportera la pile en T'. L'inclinaison n'a donc aucune influence; et l'action que la lame exerce sur la pile thermoscopique située à cinq ou six centimètres de distance est réellement insensible (12).

(12) Il faut bien remarquer qu'une telle insensibilité s'obtient lorsque les rayons de la source librement transmis par l'ouverture de l'écran

Ainsi, la nullité d'action dans le cas du transport latéral de la pile prouve indubitablement : 1°, que *la cha-*

produisent une déviation galvanométrique de 30 degrés, et nous savons que l'arc est alors le plus étendu de tous ceux qu'il convient de prendre pour comparer exactement entre elles les forces calorifiques au moyen du thermomultiplicateur. Ainsi la question de savoir dans quelle position il faut placer la lame afin qu'elle exerce, en vertu de sa propre température, la moindre perturbation possible sur la mesure de la quantité de chaleur immédiatement transmise, paraît d'abord superflue.

Cependant on conçoit que n'ayant à sa disposition que des thermoscopes peu sensibles, ou par tout autre motif, on doive exposer la lame à des rayonnements fort intenses. Alors si l'on n'arrive pas à éliminer complétement les effets perturbateurs dûs à son échauffement, du moins convient-il de les rendre aussi petits que possible, et le problème de la moindre action acquiert une utilité pratique. Nous allons donc le résoudre dans cette note, d'autant plus volontiers que la solution est intimement liée, comme on va le voir, avec la question du rapport qui existe entre l'action perturbatrice de la lame et la sensibilité du thermoscope.

Remarquons d'abord que la lame devant être interposée entre la pile et la source de chaleur, on ne saurait l'éloigner de l'une sans la rapprocher nécessairement de l'autre; en sorte que, si elle donne une action moindre par suite de son éloignement au corps thermoscopique, elle s'échauffe davantage à cause de sa plus grande proximité au centre du rayonnement.

Il s'agit de déterminer le point où la combinaison de ces deux données produit le plus petit effet possible.

Soit a la distance de la source au thermoscope, x la distance du thermoscope à la lame, i l'intensité calorifique de la source : on aura $\frac{i}{(a-x)^2}$ pour l'expression du rayonnement qui frappe la surface antérieure de la lame. Cette quantité deviendra $\frac{Ci}{(a-x)^2}$ à la surface postérieure; C étant une constante dépendante des pouvoirs absorbant et émissif de la lame, de sa conductibilité, et de la pro-

leur propre de la lame n'exerce aucune influence sur le thermomultiplicateur convenablement disposé : 2°, *que*

portion de chaleur qui peut la traverser immédiatement. Enfin le rayonnement de la surface postérieure sur le thermoscope sera exprimé par $\frac{Ci}{x^2\,(a-x)^2}$: il faut en déterminer le *minimum* y.
Or on obtient, en différentiant

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2Ci\,(2x-a)}{x^3\,(a-x)^3}$$

L'équation qui donne la quantité cherchée sera donc :

$$2x - a = 0\text{, d'où } x = \frac{a}{2}$$

Ainsi, pour que sa propre chaleur produise le moindre perturbation possible, la lame doit être placée à moitié distance de la source. Cela posé, que l'on substitue $\frac{a}{2}$ à x dans l'expression précédente $\frac{Ci}{x^2\,(a-x)^2}$, et l'on aura pour l'action e que l'échauffement de la lame exerce sur le thermoscope.

$$e = \frac{4^2 Ci}{a^4}$$

Appellons i', i'', les intensités de deux sources différentes, et a', a'', leurs distances au thermoscope. Nous allons voir bientôt dans le texte que pour mieux comparer entre elles les propriétés des diverses sortes de chaleur, on éloigne plus ou moins les sources rayonnantes, afin de produire avec chaque espèce de rayonnement la même indication thermoscopique initiale. Cette condition exprimée algébriquement donne

$$\frac{i'}{a'^2} = \frac{i''}{a''^2}.$$

Soient e', e'', les actions dues aux échauffements de la lame sous les radiations de ces deux sources, on aura la proportion

$$e' : e'' :: \frac{4^2 Ci'}{a'^4} : \frac{4^2 Ci''}{a''^4} :: \frac{i'}{a'^4} : \frac{i''}{a''^4}$$

qui devient

$$e' : e'' :: \frac{1}{a'^2} : \frac{1}{a''^2}$$



l'effet thermoscopique observé lorsque l'ouverture de l'écran, la source et la pile se trouvent sur la même di-

par suite de l'équation précédente $\frac{i'}{a'^2} = \frac{i''}{a''^2}$

On en déduit que l'action perturbatrice de la lame est en raison inverse des carrés des distances où il faut placer les sources pour qu'elles donnent la même quantité de chaleur rayonnante sur le thermoscope.

Soient maintenant deux thermoscopes do sensibilités différentes s', s''. Pour que ces deux instruments donnent la même indication sous la même radiation calorifique il faudra évidemment les placer à des distances a', a'', proportionnelles aux racines carrées de leurs sensibilités. On aura donc

$$a' : a'' :: \sqrt{s'} : \sqrt{s''}$$

d'où

$$s'' : s' :: \frac{1}{a'^2} : \frac{1}{a''^2}$$

Or, si l'on réfléchit qu'en faisant varier la sensibilité du thermoscope lorsque la source reste constante, on produit exactement le même effet que si la sensibilité du thermoscope était constante pendant que l'intensité de la source changerait, on verra qu'ici, comme dans le cas précédent, la lame interposée à moitié distance entre la source et chacun des deux thermoscopes exercera sur eux des actions e', e'', qui seront entre elles dans le rapport inverse des carrés des distances a', a'' des thermoscopes à la source; en sorte que l'on aura la proportion

$$e' : e'' :: \frac{1}{a'^2} : \frac{1}{a''^2}$$

qui, combinée avec la précédente, donnera

$$e' : e'' :: s'' : s'$$

Ainsi l'action produite par l'échauffement de la lame sur les thermoscopes est en raison inverse de leurs sensibilités. Si l'on prend des instruments ou appareils thermoscopiques de plus en plus sensibles, on arrivera donc à une limite où cette action deviendra tout-à-fait inappréciable. Voilà précisément ce qui a lieu pour le thermomultiplicateur. Alors si la lame est susceptible de transmettre, par voie immédiate, une portion du rayonnement de la source, il

rection rectiligne est dû au passage immédiat et instantané de la chaleur rayonnante à travers la lame.

Cette expérience détruit tous les doutes que l'on pourrait encore conserver à l'égard de la chaleur propagée sous forme rayonnante dans l'intérieur des corps solides, et offre en même temps un moyen fort simple de comparer les divers degrés de cette propriété dans les lames de différente nature. Nous pouvons cependant pousser encore plus loin l'analyse du phénomène, et vérifier, comme nous le disions tantôt, si cette chaleur immédiatement transmise suit bien les lois que nous avons mises en évidence en étudiant la propagation du calorique rayonnant dans l'air atmosphérique.

D'abord on ne saurait douter de sa marche rectiligne, puisque c'est sur cette propriété même que nous avons fondé la démonstration de son existence. Pour voir si le passage de l'une à l'autre surface se fait dans un temps inappréciable, il n'y a qu'à prendre une plaque fort épaisse, intercepter la radiation calorifique d'abord en deçà, en-

est clair que l'on aura comme nous venons de l'annoncer dans le texte, la mesure pure et simple de la chaleur transmise, sans aucune crainte que l'élévation plus ou moins grande qui se produit dans la température de la lame, selon la qualité des rayons incidents, vienne troubler les résultats.

L'invention du thermomultiplicateur marque donc une époque fort importante dans la science des radiations calorifiques ; car elle a permis *d'annuler expérimentalement*, pour ainsi dire, l'action perturbatrice variable que l'échauffement du milieu exerce sur la mesure des quantités de chaleur immédiatement transmises; et elle nous a fourni, en conséquence, le moyen d'imprimer aux propositions déduites des phénomènes d'absorption et de transmission que les flux rayonnants éprouvent dans l'intérieur des substances solides et liquides, un cachet de certitude qui les met à l'abri de toute objection.

suite au-delà de cette plaque, rétablir successivement l'une et l'autre communication calorifique avec la pile thermoscopique, mesurer le temps employé par l'index du rhéomètre à décrire les deux arcs d'excursion primitive, et voir si les deux mesures sont égales. Quant à l'inaptitude des particules intérieures du milieu à altérer l'intensité du rayonnement transmis, suivant leur état de repos ou de mouvement, on en jugera par la succession, plus ou moins rapide, des diverses parties d'une lame à grandes dimensions perpendiculaire à l'axe du rayonnement et disposée derrière l'ouverture de l'écran. Car si la proposition est vraie, l'index thermoscopique, qui aura pris une déviation stable sous l'action des rayons transmis, devra rester immobile dans sa position d'équilibre, malgré la variation continuelle de cette partie de la lame qui est actuellement traversée par la radiation calorifique.

Or, tous ces phénomènes se produisent immanquablement chaque fois que l'on se trouve dans les conditions nécessaires, c'est-à-dire, chaque fois que l'on a à sa disposition une lame assez large ou assez épaisse d'une substance capable de livrer passage à tel ou tel rayon de chaleur. Et comme nous verrons bientôt des corps transmettre les radiations des sources de la plus basse température, aussi bien que celles des flammes et des corps incandescents, on comprend de suite comment, dans ces divers cas particuliers, l'on peut mettre en évidence cette vérité fondamentale: que toute sorte de chaleur rayonnante obéit, en traversant un milieu solide ou liquide, aux trois lois que nous venons de rappeller.

Avant de passer à la description des expériences qui donnent les proportions de chaleur transmises par les di-

verses substances solides et liquides, il ne sera peut-être pas inutile de remarquer, que l'objection soulevée, dans ces derniers temps, contre l'analyse de la lumière par absorption proposée par M. Brewster, ne saurait s'appliquer au cas qui nous occupe. On a dit avec raison que la lumière observée à travers une lame colorée de verre ou d'autre substance diaphane pourrait fort bien ne pas représenter l'excès des rayons incidents sur les rayons absorbés et réfléchis par la substance interposée, si une portion de l'effet produit sur l'œil prenait sa source dans l'état lumineux même que la lame acquiert en présence du rayonnement. Mais toute la force de cette objection repose sur la possibilité que la lumière propre du milieu vienne exercer son influence sur l'instrument employé dans l'étude du phénomène, et notre méthode de mesurer la transmission calorifique exclut complétement cette supposition, puisque l'action due à l'échauffement ou à *toute autre sorte de radiation provenant de la portion du milieu interposé sur le passage du faisceau transmis*, est insensible au thermomultiplicateur convenablement disposé.

Il faut donc accepter comme parfaitement démontré que l'effet calorifique obtenu derrière nos lames, avec toutes les conditions indiquées ci-dessus, tire son origine des seuls rayons de la source, qui parviennent sur le thermoscope après avoir échappé aux forces de réflexion et d'absorption du milieu, et que cet effet représente en conséquence la véritable valeur de la transmission calorifique.

Cela posé, rien de plus simple que la manière dont il faut procéder pour mesurer les quantités de chaleur transmises par les lames de qualités et d'épaisseurs différentes.

Après s'être procuré une source constante de chaleur,

on place, à une certaine distance, un écran vertical percé à son centre d'un trou circulaire de quatre à cinq millimètres de rayon. Derrière l'écran, et sur l'alignement des centres de la source et de l'ouverture, on met la pile thermo-électrique à faisceau; on éloigne ou on rapproche celle-ci de l'écran, ou l'écran de la source, jusqu'à ce que l'index du rhéomètre se tienne sur une déviation stable de 30 à 35 degrés. Alors on interpose une double lame métallique entre la source et l'écran percé, afin d'arrêter le rayonnement de la source et voir si toutes les parties de l'appareil sont à la même température, de manière à ce que l'index du rhéomètre se tienne dans sa position naturelle d'équilibre. Ce dernier effet obtenu, on établit la communication calorifique, on note le degré de déviation dû à la chaleur rayonnée librement sur la pile; puis on place contre l'ouverture de l'écran, et du côté de la pile, le corps dont on désire connaître le pouvoir de transmission rayonnante. La radiation se trouvant ainsi obligée de traverser la substance diaphane avant de parvenir sur la pile, l'index du rhéomètre descendra plus ou moins vers le zéro, et s'arrêtera à un certain degré du cadran. Pour s'assurer que l'arc de déviation sur lequel se soutient l'index de l'instrument est dû à la seule transmission immédiate, on aura recours à l'expérience indiquée tantôt du transport latéral de la pile, et on verra si l'index du rhéomètre revient au zéro. On remettra enfin la pile sur l'axe du rayonnement, et l'on prendra une seconde mesure de la transmission. Si tout est convenablement disposé, on trouvera que celle-ci coïncide avec la première à un degré de précision étonnante. Lorsqu'il manque quelques unes des circonstances dont le concours est indispensable pour obtenir une telle précision,

lorsque le rapport de température entre l'air et les corps solides change trop rapidement ou que le milieu ambiant est par trop agité, on corrigera l'influence des variations qui en résultent sur les valeurs successives d'une même mesure, en prenant la moyenne d'un certain nombre d'observations.

Nous avons déjà remarqué que l'heureuse construction du thermomultiplicateur permet de s'approcher de l'instrument et de lire à son aise les indications, sans craindre que la chaleur propre du corps vienne troubler les résultats. Cela ne signifie point toutefois qu'on ne doive prendre quelques précautions à cet égard. Ainsi il est convenable de s'assurer d'abord si pendant les diverses opérations nécessaires à établir et à intercepter les communications, la pile ne reçoit pas, directement ou par la réflexion des surfaces environnantes, quelques rayons calorifiques de la main ou du visage malgré le tube qui la protège. A cet effet il faudra supprimer la source de chaleur, ou l'abriter derrière un écran de métal, et voir par des opérations préliminaires tout à fait semblables à celles que l'on doit exécuter pendant les expériences, si quelqu'action se développe sur le rhéomètre : dans le cas affirmatif il sera facile d'éliminer cette action perturbatrice par une disposition convenable de quelques écrans nouveaux.

Les sources calorifiques de différentes températures placées à une même distance donnent des rayonnements plus ou moins intenses. Mais en variant la distance, on comprend qu'il sera toujours possible de faire produire, à ces diverses sources de chaleur, la même action sur le corps thermoscopique.

Le changement de distance des sources, le placement des lames et des écrans, le transport de la pile thermoscopique hors de l'axe du rayonnement, son retour dans la position initiale, et une infinité d'autres opérations relatives à l'étude de la chaleur rayonnante, se font avec la plus grande facilité, et avec toute l'exactitude convenable, au moyen de l'appareil représenté par la figure 12 de la planche située à la fin du volume.

Cet appareil se compose essentiellement d'une barre aplatie de cuivre AB d'un mètre environ de longueur, parfaitement dressée, et placée de champ le long d'une planchette TT, d'où elle est séparée par un intervalle de quatre à cinq centimètres moyennant deux pieds S, S'. La planchette porte à ses quatre coins des vis à caler V, V, etc., qui servent à la raffermir sur le plan horizontal où elle est posée. Une seconde barre CD de même épaisseur, mais plus courte de deux tiers, s'attache par une de ses extrémités à un point quelconque de la première, et tourne autour d'un axe vertical passant par le point de jonction des deux barres; de manière qu'elle peut se mettre dans le même plan que la barre AB, ou former avec elle un angle quelconque DCD'. Le mécanisme qui sert à arrêter cette extrémité se compose d'une *enfourchure*, ou canal rectangulaire renversé qui se moule exactement sur la grande barre, et d'une vis de pression. On peut mettre, ôter, ou faire glisser l'extrémité C le long de AB en tournant la vis et en soulevant la pièce, ou en la poussant dans la direction convenable.

Ce même mécanisme est adapté aux soutiens qui doivent porter la source calorifique, les lames des substances que l'on veut soumettre aux expériences, la pile ther-

moscopique, et les divers écrans de métal qui servent à intercepter ou à transmettre un faisceau donné de chaleur rayonnante, ou bien à mettre la source et la pile à l'abri des courants d'air et de la radiation des corps environnants. Ces soutiens se composent de deux parties: la première, égale pour tous, consiste dans un tube ou colonne creuse fendue en croix à son extrémité supérieure, qui est travaillée extérieurement sous forme de vis, et munie d'un écrou légèrement conique au moyen duquel on peut serrer plus ou moins les fentes et avec elles l'ouverture du tube; la base se termine par le canal rectangulaire renversé qui sert à faire glisser le soutien sans oscillations le long des barres AB ou CD, et par la vis de pression moyennant laquelle on arrête la colonne à telle position que l'on désire sur l'une ou l'autre barre.

La seconde partie du soutien se compose d'une tige, qui, ayant un diamètre un peu moindre que celui du tube, s'y emboîte exactement et se fixe ensuite à la hauteur convenable par la pression de l'écrou conique. La tige s'adapte à un appendice qui varie de forme selon l'usage auquel le soutien est destiné. S'agit-il de porter la source de chaleur, la tige est vissée à un plan horizontal circulaire garni de rebords et de tout ce qu'il faut pour tenir en place la lame recourbée de cuivre, les lampes, et la spirale de platine dont il a été question dans le second chapitre (*Voyez la pièce* M). Faut-il soutenir l'écran métallique, percé à son centre, derrière lequel se placent les corps destinés aux expériences, la tige vient se souder à la partie inférieure de l'écran, qui est formé d'une lame de laiton polie du côté de la source, et noircie à la colle sur la face opposée; contre celle-ci est juxtaposé un disque

excentrique mobile autour de son centre et portant vers la circonférence une série de trous de différents diamètres, qui, par un mouvement de rotation, s'appliquent successivement contre l'ouverture centrale de l'écran, de manière à laisser passer un faisceau plus ou moins large de rayons calorifiques (O). Un simple plan horizontal vissé au bout de la tige suffit lorsqu'il s'agit de porter les lames employées dans l'étude de la transmission; ces lames s'assujettissent par un de leurs côtés, dans une position verticale, sur un morceau de liége fendu, que l'on garnit de plomb à sa base afin de le tenir en équilibre stable (P). Pour l'écran qui doit intercepter la communication calorifique entre la source et les lames, la tige doit porter une charnière que l'on tourne perpendiculairement à la barre AB, afin de laisser le passage libre aux rayons lorsqu'on abat l'écran, et de l'intercepter complétement lorsque celui-ci est relevé. Cet écran doit être brillant du côté de la source, et peint en noir du côté opposé, ou mieux encore, composé de deux lames parallèles, l'une brillante, pour rendre son échauffement insensible dans le cas où elle intercepte le rayonnement de la source, et l'autre noircie, pour empêcher que les rayons calorifiques de l'observateur ou de tout autre corps chaud ne se réfléchissent sur la pile (N). Les écrans destinés à détourner les courants d'air ou à préserver la pile de l'action calorifique des corps environnants sont fixés hors de l'axe de la tige, à l'extrémité d'une petite barre horizontale soudée avec elle, formant une espèce d'équerre, et laissant ainsi entièrement libre le passage au rayonnement de la source que l'on explore, le long de la barre AB ou le long de la barre CD, selon que l'on veut étudier les rayons directs ou les rayons réfractés ou réflé-

chis (E). Enfin, lorsqu'il s'agit de la pile thermoscopique, la tige porte une charnière semblable à celle de l'écran mobile, et les choses sont combinées de telle sorte que, l'instrument étant vissé à l'extrémité de la tige, la charnière se trouve dans le même plan que l'axe de la pile. On a soin de tourner la charnière et la pile dans le sens de la barre où le soutien est appliqué, afin que par le soulèvement ou l'abaissement de la tige et la rotation de la charnière, l'axe de l'instrument puisse coïncider exactement avec l'axe du rayonnement calorifique (R).

C'est au moyen d'un appareil de cette nature qu'ont été obtenus les résultats contenus dans les deux tableaux suivants. Les expériences du premier tableau se rapportent à une série de lames de divers corps solides, plus ou moins diaphanes, réduites à l'épaisseur commune de 2, 6 millimètres, et exposées successivement à quatre radiations différentes. Les sources de chaleur d'où provenaient ces radiations ont été décrites en détail dans le second chapitre. On les avait placées à des distances plus ou moins grandes, afin qu'elles donnassent toutes la même déviation de 30 degrés au rhéomètre en vertu de leur rayonnement libre sur la pile thermoscopique; il m'a paru qu'en se débarrassant ainsi des différences de *quantité*, les différences de *qualité* en seraient devenues d'autant plus évidentes.

Les déviations observées à travers les lames, réduites en intensités ou forces correspondantes, d'après les méthodes indiquées au premier chapitre, et comparées à l'intensité du rayonnement libre, qui est représenté par **100**, ont donné les nombres insérés dans les quatre colonnes comprises sous le titre commun de transmissions calorifiques.

Le second tableau fournit les quantités de chaleur tran-

smises par des couches égales de différents liquides introduits dans une série d'ouvertures prismatiques traversant de part en part une grosse plaque de verre et bouchées par des lames minces de la même substance; ces couches étaient trois à quatre fois plus épaisses que les plaques du premier tableau. Enfin on avait pris pour source rayonnante une lampe d'Argant munie de sa cheminée de verre. On ne saurait donc comparer, au moyen de ces deux tableaux, les transmissions calorifiques des liquides à celles des solides. Nous verrons dans le paragraphe suivant comment on a pu atteindre ce but pour l'eau et l'huile de colza. Maintenant il nous suffira de faire observer que, si les données relatives aux corps solides ne sont pas comparables à celles qui se rapportent aux substances liquides, on peut toutefois établir des comparaisons fort exactes entre les nombres que chacun des deux tableaux renferme. Aussi la discussion que nous allons entreprendre sur ces résultats sera-t-elle essentiellement soumise à cette dernière condition.

TABLEAU I.

Numéros d'ordre	NOMS DES SUBSTANCES INTERPOSÉES *réduites à une épaisseur commune de 2, 6 millimètres*	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES (en centièmes de la radiation incidente)			
		pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent	pour le cuivre à 400°	pour le cuivre à 100°
1	Sel gemme (limpide)	92,3	92,3	92,3	92,3
2	Soufre de Sicile (jaune)	74	77	60	54
3	Spath fluor (limpide)	72	69	42	33
4	Sel gemme (louche)	65	65	65	65
5	Béril (jaune verdâtre)	54	23	13	0
6	Spath fluor (verdâtre)	46	38	24	20
7	Spath d'Islande (limpide)	39	28	6	0
8	autre espèce (limpide)	38	28	5	0
9	Verre (limpide)	39	24	6	0
10	autre espèce, (limpide)	38	26	5	0
11	Cristal de roche (limpide)	38	28	6	3
12	Cristal de roche (enfumé)	37	28	6	3
13	Chromate acide de potasse (orangé)	34	28	15	0
14	Topaze blanche (limpide)	33	24	4	0
15	Carbonate de plomb (limpide)	32	23	4	0
16	Sulfate de baryte (louche)	24	18	3	0
17	Feldspath adulaire (louche)	23	19	6	0
18	Améthyste (violet)	21	9	2	0
19	Ambre artificiel (jaune)	21	5	0	0
20	Aigue marine (vert bleuâtre)	19	13	2	0
21	Agathe (jaune louche)	19	12	2	0
22	Borate de soude (louche)	18	12	8	0
23	Tourmaline (vert foncé)	18	16	3	0
24	Gomme commune (jaunâtre)	18	3	0	0
25	Spath pesant (louche veiné)	17	11	3	0
26	Sélénite (limpide)	14	5	0	0
27	Acide citrique (limpide)	11	2	0	0
28	Carbonate d'ammoniaque (louche strié)	12	3	0	0
29	Tartrate de potasse et de soude (limpide)	11	3	0	0
30	Ambre naturel (jaune)	11	5	0	0
31	Alun (limpide)	9	2	0	0
32	Colle forte (brun jaunâtre)	9	2	0	0
33	Sucre candi (limpide)	8	1	0	0
34	Spath fluor (vert foncé veiné)	8	6	4	3
35	Sucre fondu (jaunâtre)	7	1	0	0
36	Glace (limpide)	6	0,5	0	0

TABLEAU II.

Numéros d'ordre	NOMS DES COUCHES LIQUIDES INTERPOSÉES ENTRE DEUX LAMES DE VERRE *épaisseur commune de 9, 21 millimètres*	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES pour le rayonnement d'une lampe d'Argant, armée de sa cheminée de verre, en centièmes de la radiation incidente.
1	Carbure de soufre (incolore)	63
2	Bi-chlorure de soufre (rouge grenat foncé)	63
3	Proto-chlorure de phosphore (incolore)	62
4	Hydrocarbure de chlore (incolore)	37
5	Huile de noix (jaune)	31
6	Essence de térébenthine (incolore)	31
7	Essence de romarin (incolore)	30
8	Huile de colza (jaune)	30
9	Huile d'olive (jaune verdâtre)	30
10	Naphte naturel (jaune brun)	28
11	Baume de copahu (brun jaunâtre)	26
12	Essence de lavande (incolore)	26
13	Huile d'œillet (blanc jaunâtre)	26
14	Naphte rectifié (incolore)	26
15	Éther sulfurique pur (incolore)	21
16	Acide sulfurique pur (incolore)	17
17	Acide sulfurique de Nordhousen (brun)	17
18	Hydrate d'ammoniaque (incolore)	15
19	Acide nitrique concentré (incolore)	15
20	Alcool absolu (incolore)	15
21	Hydrate de potasse (incolore)	13
22	Acide acétique rectifié (incolore)	12
23	Acide pyro-ligneux (brun)	12
24	Solution concentrée de sucre (incolore)	12
25	Solution de sel gemme (incolore)	12
26	Solution d'alun (incolore)	12
27	Blanc d'œuf (blanc-jaunâtre)	11
28	Eau distillée	11

Le premier résultat qui frappe l'imagination en jetant les yeux sur le tableau I, c'est la transmission très-abondante du calorique rayonuaut par les lames de sel gemme, et surtout la constance de cette propriété pour toutes sortes de radiations calorifiques. Ce phénomène est effectivement de la plus grande importance; car seul il suffit pour démontrer combien l'idée que l'on s'était formée sur la nature des rayons calorifiques, provenant des sources à basse température, était erronée. En voyant ces rayons traverser un corps solide tout aussi aisément et abondamment que les radiations des flammes et des corps incandescents, il faut bien en conclure que les diverses espèces de chaleurs rayonnantes ne diffèrent pas essentiellement entre elles, et que leurs différences de transmission par rapport au verre et aux autres substances mentionnées dans les deux tableaux ne sont autre chose que des *caractères spécifiques*, analogues à ceux qui existent entre les rayons lumineux de couleurs différentes. Les corps portés à des températures plus ou moins élevées deviennent ainsi, pour nous, de véritables sources de ***chaleurs colorées;*** le verre, et autres substances diaphanes, transmettant en diverses proportions ces ***couleurs de chaleur***, constituent des ***milieux colorés par rapport à la chaleur;*** et le sel gemme, un milieu ***incolore*** à travers lequel toutes les ***chaleurs colorées*** se transmettent avec la même intensité.

Qu'on le remarque bien : nous n'adoptons ici aucune hypothèse, mais nous posons un simple rapprochement entre deux ordres de faits qui nous paraissent doués d'une certaine analogie. Bientôt une étude approfondie de la marche des rayons dans l'intérieur de l'eau, du verre, de la sélénite, du mica, et l'analyse des phénomènes que pré-

sente le passage de la chaleur de l'un à l'autre milieu, nous rendront moins timides.

Maintenant, répétons-le, c'est une pure comparaison que nous mettons en vue, afin de rattacher aux idées parfaitement familières de transparence et de couleur, une série de phénomènes qui se cachent pour ainsi dire à nos sens, et se rapportent à un agent dont nous ne pouvons guère apprécier directement que la seule intensité.

Cependant, pour éviter de longues périphrases, et donner plus de clarté à l'exposition, nous pouvons, dès à présent, appliquer la dénomination de *thermochrôse*(*) à cette propriété des milieux et des radiations calorifiques qui vient d'être assimilée à la coloration des corps et des rayons lumineux, parce qu'elle produit des effets semblables; de là nous tirerons *athermochrôse* (**) pour exprimer la propriété opposée du manque de coloration. Avec le mot *thermochroïque* nous entendrons un milieu ou un rayonnemment calorifique doué de la thermochrôse; et nous dénoterons le corps qui en est privé par le terme *athermochroïque*.

La différence si remarquable que présente au premier abord la transmission du sel gemme relativement aux autres corps, m'a engagé à changer quelque peu l'ordre naturel des idées dans la discussion des résultats numériques que renferment nos tableaux; car, le sujet dont nous devions nous occuper étant le passage immédiat du calorique rayonnant à travers les corps, il semble que l'on aurait dû commencer par examiner quelle est la série et

(*) *De* termon *chaud*, *chaleur*, *et* croa *couleur*; *d'où* croo *colorer et* crosis *coloration*: coloration de la chaleur.

(**) *De* a *privatif et* thermochrôse: sans coloration de chaleur.



la succession graduée des substances douées d'une telle propriété; il semble, en d'autres termes, que l'on aurait dû commencer par établir l'*échelle de la transparence des corps relativement à la chaleur*. Mais pour justifier en quelque sorte, la marche adoptée, je ferai observer que, non seulement les rapports numériques des transmissions, mais l'ordre même des *transparences calorifiques*, varient avec la qualité de la source employée. Nous voyons, en effet, la seconde lame de la série transmettre presqu'autant de chaleur que la troisième pour la première source, et beaucoup plus pour les suivantes; la sixième lame, qui a une transmission inférieure à la cinquième pour la première source, lui devient supérieure pour les trois autres, et cette différence grandit tellement à l'égard de la quatrième source qu'un cinquième de la chaleur incidente passe encore librement à travers la sixième lame, tandis que la cinquième lame devient tout-à-fait *opaque* pour cette espèce de chaleur. Les lames des numéros 22 et 23 sont douées de la même transmission pour le rayonnement de la première source et présentent les deux phases contraires à l'égard des deux sources suivantes; car, dans la seconde, la trasmission du numéro 23 devient supérieure à celle du numéro 22; et dans la troisième, la transmission du numéro 22 surpasse à son tour la transmission du numéro 23. D'autres inversions analogues se rencontrent dans le même tableau, sans parler des proportions relatives, qui changent presque toutes en passant de l'une à l'autre colonne.

Si nous voulons savoir quel est l'ordre des *transparences calorifiques* il nous faudra donc choisir *la qualité de rayonnement incident*. Examinons successivement nos *diverses échelles* de transmission, et une inspection minu-

tieuse des résultats nous montrera l'existence d'un phénomène tout aussi remarquable, tout aussi inattendu, que l'action constante du sel gemme sur les différentes espèces de chaleur rayonnante.

Les substances qui ont été soumises aux expériences ne sont pas toutes incolores, on en trouve plusieurs colorées ou simplement rembrunies; dans l'un et l'autre cas, la présence de la matière colorante, ou de cette modification quelconque du corps à laquelle est due la coloration visible du milieu, diminue nécessairement la transparence qu'il aurait dans l'état incolore. Or, en comparant les données relatives aux substances colorées ou rembrunies avec celles des subtances incolores, on trouve que l'ordre des transmissions n'a aucun rapport avec celui des transparences proprements dites, et que souvent des corps d'une teinte très-foncée transmettent beaucoup plus de chaleur que les milieux les plus limpides. Ainsi, en considérant tout d'abord le rayonnement le plus lumineux, qui est celui de la lampe de Locatelli, on voit l'acide citrique, le tartrate de potasse et de soude, l'alun, la glace, substances tout-à-fait diaphanes et sans la moindre trace de couleur, transmettre trois à six fois moins que la lame du n° 12, qui est un cristal de roche enfumé, quatre à huit fois moins que la lame du n.° 6, composée de spath fluor verdâtre, cinq à neuf fois moins que la lame du n.° 5, formée de béryl jaune verdâtre.

Les différences ne sont pas moins apparentes dans la classe des milieux liquides, malgré la qualité plus propice du rayonnement employé qui surpasse sans aucun doute, en fait d'intensité calorifique et lumineuse, la radiation de la lampe de Locatelli. L'inspection du tableau II nous montre,

en effet, que les huiles d'olive, de noix, de colza transmettent trois fois plus de chaleur que l'eau distillée, et que la transmission calorifique de ce dernier liquide, cité comme le type de la limpidité, est six fois inférieure à la transmission calorifique du bi-chlorure de soufre, qui, par sa couleur rouge-grenat très-sombre, constitue indubitablement le liquide le moins transparent de la série.

Il est superflu de pousser plus loin ces comparaisons, car elles suffisent, et au-delà, pour montrer que lorsqu'il s'agit des radiations calorifiques et lumineuses des flammes, l'échelle de la TRANSPARENCE *des corps, relativement aux rayons de chaleur, n'est pas celle de leur transparence par rapport aux rayons de lumière.*

Un simple coup d'œil, jeté sur le tableau I, suffit pour montrer que la différence entre la transparence calorifique et la transparence lumineuse des corps se manifeste aussi à l'égard des métaux portés à diverses températures. On voit même qu'elle y est beaucoup plus prononcée, comme il fallait s'y attendre ; car l'alun, l'acide citrique et autres substances incolores, exposées aux radiations du platine incandescent et du cuivre chauffé à 400 et à 100 degrés, deviennent *complétement opaques* par rapport à la chaleur, tandis que certains corps colorés, ou peu diaphanes, comme le soufre et le sel gemme impur, donnent encore des transmissions très-marquées.

Il nous faut donc un terme spécial pour distinguer cette *transparence*, ou *diaphanéité calorifique*, de la transparence ou diaphanéité lumineuse. Nous l'appellerons *transcalescence* ou *diathermasie* (*). *Diatherma-*

(*) *Du grec dia par, à travers, et termao chauffer:* transparence calorifique.

que (*) exprimera alors l'attribut des corps doués de la diathermasie. *Adiathermasie* (**) et *adiathermique* (***) signifieront la qualité opposée, c'est-à-dire l'*opacité calorifique*, considérée, soit abstraitement, soit par rapport à une substance ou à une classe déterminée de corps (13).

Mais ici se présente une question très-intéressante: cette différence, qui existe parfois entre la diathermasie et la transparence proprement dite, irait-elle par hasard jusqu'à une opposition complète ; en d'autres termes, un corps parfaitement opaque pourrait-il être diathermique?

L'expérience a déjà résolu cette question dans le sens affirmatif. Nous connaissons aujourd'hui trois substances qui, réduites à une certaine épaisseur, transmettent les

(*) *De* dia *par*, *à travers*, *et* termon *chaud*, *chaleur* : diaphane pour la chaleur.

(**) *De* a *privatif*, *et* diathermasie *transcalescence*: opacité calorifique.

(***) *De* a *privatif*, et diathermique *transcalescent* : opaque pour la chaleur.

(13) Entrainé par l'analogie de composition avec le mot diaphane, j'avais d'abord appelé *diathermane* ce qui me semble maintenant, d'après les règles de l'étymologie, beaucoup mieux exprimé par *diathermique*. Da diathermane j'avais déduit *diathermanéité* pour indiquer la transcalesceneo des milieux, propriété que jo crois aujourd'hui plus convenablement rendue par lo mot *diathermasie*. Ampère avait proposé une dénomination très-rapprochée do cette dernièro, savoir *diathermansie*, pour dénoter l'absorption variable que l'eau, le verre, et presque tous les milieux calorifiques exercent sur les radiations des différentes sources de chaleur; mais cetto signification, totalement conventionnelle, n'était applicable qu'aux phénomènes de transmission, et nous verrons plus tard les corps blancs opaques, et les substances adiathermiques, en général, présenter des faits qui décèlent chez eux *l'existence de la même force d'absorption élective, et qui exigent, par conséquent, l'emploi de la même dénomina-*

rayons calorifiques de plusieurs sources, tout en interceptant complétement le passage des rayons lumineux : ce sont les verres noirs, les micas noirs, et le sel gemme dans un état particulier d'opacité que nous examinerons plus tard. On peut étudier commodément ce curieux phénomène au moyen du verre noir opaque que les opticiens emploient pour construire les miroirs destinés à la polarisation de la lumière. Dans ce cas, la transmission calorifique s'obtient sur les lames de cette espèce de verre, telles qu'on les trouve dans le commerce, et sur des épaisseurs qui peuvent aller jusqu'à trois ou quatre millimètres. Mais si l'on veut obtenir le *maximum* d'effet, il faut faire polir la lame sur ses deux faces, et la rendre aussi mince que possible sans lui communiquer la plus légère transparence. Afin d'être bien sûr de cela, il ne suffit point de constater que les images des corps terrestres sont totalement interceptées, il faut aussi qu'il n'y ait pas la moindre trace de transmission lumineuse lorsqu'on interpose la lame entre l'œil et le soleil le plus brillant. Cette condition étant remplie, on placera la lame contre l'ouver-

tion. Un autre physicien fort distingué a désigné cette action variable, que les corps exercent sur les radiations calorifiques, par l'expression *thermanisme :* mais cette expression, très-simple à la vérité et très-facile à prononcer, pèche évidemment *par sa trop grande généralité* ; elle n'offre d'ailleurs qu'une idée confuse d'échauffement, et ne contient aucune allusion à l'état rayonnant de la chaleur. La dénomination que nous avons adoptée définitivement rappelle l'idée du rayonnement calorifique, montre la grande analogie du phénomène qui nous occupe avec l'action que les corps colorés exercent sur la lumière, elle est d'une prononciation tout aussi facile que le mot *thermanisme*, et paraît enfin satisfaire à toutes les exigences de la science.

ture de l'écran , la source calorifique d'un côté , et le thermomultiplicateur de l'autre, et l'on verra que les rayons de nos trois premières sources passent au travers dans une proportion très-appréciable , plus ou moins grande selon la qualité et l'épaisseur de la lame, arrivant au quart, au tiers, et surpassant même, dans certains cas, la moitié de la chaleur incidente.

Ceux qui observent le phénomène pour la première fois ne manquent presque jamais de l'attribuer à la chaleur absorbée par la lame et rayonnée ensuite sur le thermoscope. Pour démontrer l'erreur d'une telle conclusion, il n'y a qu'à répéter sur la lame opaque quelques unes des expériences au moyen desquelles nous avons prouvé la diathermasie des substances transparentes. On commencera donc par retirer la pile hors de la direction des rayons, en la maintenant toujours à la même distance de la lame, constamment tournée vers elle, et l'on fera remarquer que dans cette nouvelle position du corps thermoscopique les aiguilles du galvanomètre descendent au zéro du cadran. On pourra ensuite tourner doucement la lame et la diriger perpendiculairement à l'axe de la pile, sans que pour cela l'index de l'instrument montre la moindre tendance à dévier de nouveau. Outre cette expérience, qui suffit à elle seule pour démontrer incontestablement la transmission immédiate de la chaleur rayonnante par le corps quelconque interposé sur son passage, on pourra aussi, lorsque la pile se trouve sur l'axe de la radiation et l'index du rhéomètre stablement dévié, produire une succession rapide des diverses parties de la lame devant l'ouverture de l'écran, et faire observer que ce mouvement transversal de la lame ne trouble point la déviation existante.

Si l'observateur ne saisit pas encore l'évidence de la démonstration, on lui montrera une expérience qui prouve, pour ainsi dire matériellement, que l'influence de l'échauffement de la couche diathermique est nulle; ce qui ne manque jamais de convertir les esprits les plus rebelles. A cet effet on prendra deux écrans percés, que l'on placera sur la grande barre de l'appareil décrit tantôt (fig. 12), à une distance mutuelle de deux décimètres environ, en sorte que leurs ouvertures se trouvent sur l'axe de la radiation calorifique; puis, l'on introduira la lame opaque entre les deux, et, en la promenant de l'une à l'autre ouverture, on verra que ce changement de position n'apporte aucune altération appréciable dans l'indication de l'instrument thermoscopique, altération qui aurait lieu nécessairement si l'action manifestée provenait, en tout ou en partie, de l'échauffement de la lame.

Les détails dans lesquels nous venons d'entrer trouvent leur excuse dans l'importance du fait qu'ils tendent à établir sur des bases solides. On connait les sentiments de surprise et d'admiration avec lesquels furent accueillies, il y a environ cinquante ans, les preuves inattendues de l'existence d'une radiation calorifique obscure parmi les rayons solaires. Or, le passage immédiat de la chaleur rayonnante à travers les corps opaques n'est, pour ainsi dire, que le complément de cette brillante découverte de W. Herschel.

En effet, puisque le phénomène s'accomplit sous l'action des flammes et des métaux incandescents, il s'en suit que les lumières des sources terrestres contiennent une quantité plus ou moins grande de rayons calorifiques obscurs, et se trouvent ainsi dans le même cas que le rayonnement solaire.

Nous verrons bientôt que, malgré leur incapacité d'agir sur l'organe de la vue, ces radiations obscures des flammes et des corps incandescents se composent de plusieurs éléments doués de propriétés totalement analogues aux couleurs des radiations lumineuses. Malheureusement, les faits qui montrent la vérité d'une telle proposition ne possèdent pas cette beauté physique, si attrayante, qu'offrent les expériences de Newton sur la composition de la lumière ; ils ne sont pas toutefois entièrement privés de ce charme intellectuel, propre aux découvertes que les bornes de nos sens semblaient devoir nous interdire ; et cela suffira, je l'espère, pour attirer l'attention des philosophes et de tous ceux qui s'intéressent aux progrès des sciences physiques.

Mais reprenons notre discussion générale sur les diverses proportions de chaleur transmise par les substances diaphanes.

On voit par l'inspection du premier tableau que le sel gemme, le spath fluor et le soufre se laissent traverser par des quantités plus ou moins grandes du rayonnement des corps chauffés au-dessous de l'incandescence. Cette propriété ne se borne pas à la chaleur des sources à 400 ou 100 degrés, mais elle s'étend jusqu'aux rayonnements des sources calorifiques qui surpassent à peine de quelques degrés la température de l'air ambiant. Ainsi, en plaçant une lame de sel gemme, de soufre ou de spath fluor près de l'ouverture du tube de la pile thermoscopique, et en présentant ensuite la main à une certaine distance de cette lame, on voit avec surprise les aiguilles du galvanomètre se mettre aussitôt en marche, quelle que soit l'épaisseur de la lame, comme si les rayons tombaient directement sur la

pile, tandis que des plaques beaucoup plus minces de cristal de roche, d'alun, de verre, ou de tout autre corps diathermique pour les sources de chaleur à température élevée, interceptent totalement la radiation de la main, et laissent l'aiguille dans le repos le plus absolu.

Nous avons déjà remarqué que les proportions relatives de chaleur transmise par les diverses substances, et jusqu'à l'ordre même de la diathermasie, changent avec la source de chaleur. Cela montre, évidemment, que le phénomène de la transmission tire son origine de la nature particulière des rayons calorifiques, et non pas de leur quantité; car s'il dépendait uniquement de la température de la source de chaleur, ainsi qu'on le soutenait du temps de Delaroche, les transmissions des lames de différente nature varieraient toutes dans le même rapport en passant de l'une à l'autre source, et l'échelle de la diathermasie serait invariable. Cependant, comme la transcalescence de chaque corps augmente, en général, en allant du vase métallique noirci chauffé à 100 degrés jusqu'à la flamme, quelques observateurs admettaient encore dernièrement qu'il y avait entre l'intensité du foyer rayonnant et la transmission calorifique de chaque corps, une certaine relation, en vertu de laquelle, la quantité de chaleur, qui traverse une substance donnée, devait nécessairement augmenter avec la température de la source.

Voici une observation d'un jeune et habile physicien de Berlin, M. Knoblauch, qui est éminemment propre à montrer que la transmission calorifique peut fort bien augmenter lorsque la température de la source diminue, ou vice versâ.

Le lecteur a sans doute présent à la mémoire que notre

seconde source de chaleur consiste dans une petite spirale de fil de platine, maintenue à l'état d'incandescence par le contact de la couche superficielle d'une flamme alcoolique.

Or, on conçoit que cette flamme, fournissant sans cesse la chaleur perdue par le rayonnement du métal, doit avoir dans son état d'isolement une température plus élevée que celle de la spirale. Si la transmission des corps augmentait nécessairement avec la température de la source rayonnante, il faudrait donc que la quantité de chaleur qui traverse une substance donnée fût plus grande dans le premier cas que dans le second, tandis que l'on trouve précisément le contraire. En effet, ces deux sources produisant successivement au thermomultiplicateur la même déviation de 35 degrés par l'action directe de leur rayonnement, M. Knoblauch a vu l'index de son appareil descendre à 16 degrés pour la flamme d'alcool, et à 19 pour le platine incandescent, lorsqu'on interposait sur le passage des rayons la même plaque de verre. La sélénite et toutes les substances explorées par l'auteur produisirent un effet analogue. En répétant ces expériences sur plusieurs corps de différente nature et de diverses épaisseurs, j'ai obtenu les résultats suivants.

TABLEAU III.

NOMS DES SUBSTANCES INTERPOSÉES	Épaisseurs en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES (en centièmes de la radiation incidente)		
		pour la flamme d'alcool	pour le platine incandescent	pour la flamme d'huile
Verre incolore	0, 88	41, 2	52, 8	70, 6
idem	8, 71	5, 7	26, 2	40, 7
Sélénite	0, 85	4, 4	19, 5	27, 8
idem	7, 82	1, 7	3, 5	11, 2
Alun	4, 47	0, 9	1, 8	7, 7
Mica jaunâtre	0, 38	63, 9	62, 4	72, 8
Soufre	6, 02	69, 2	65, 6	63, 3
Verre noir	0, 62	52, 6	42, 8	37, 9
idem	1, 84	29, 9	27, 1	25, 3
Mica noir	0, 19	62, 8	52, 5	43, 8
idem	0, 28	43, 3	28, 9	24, 4

Si l'on ne considère d'abord que les seules données relatives aux corps inscrits dans les cinq premières lignes de la seconde et de la troisième colonne numérique du tableau, on voit les lames de verre ordinaire, de sélénite et d'alun transmettre la chaleur du platine incandescent en plus grande quantité que celle de la flamme d'alcool; mais les nombres contenus dans les lignes suivantes de ces mêmes colonnes viennent bientôt nous avertir que d'autres substances agissent en sens contraire.

Ainsi le fait annoncé par M. Knoblauch est vrai; mais, loin de s'appliquer à tous les milieux diathermiques, comme on aurait pu le croire au premier abord, il subit une inversion complète pour le soufre, et surtout pour le mica noir et le verre noir, qui transmettent en proportion moindre la chaleur du platine incandescent que la chaleur de la flamme d'alcool. Or, cette inversion est justement la meilleure

preuve possible que l'accroissement de transmission calorifique observé dans le verre et autres substances diathermiques, à mesure que la température de la source s'élève, ne dérive pas de la plus grande quantité de chaleur accumulée dans le foyer rayonnant. En effet, la supériorité de température de la flamme d'alcool sur notre platine incandescent paraît extrêmement probable; toutefois il ne faut point se dissimuler que l'argumentation d'où l'on déduit cette conséquence n'est pas tout à fait exempte d'objections. Ne pourrait-on pas dire, par exemple, que le platine chauffé par la flamme alcoolique réagit sur elle et tend à augmenter sa température? Alors cette source composée, possédant un degré de chaleur plus élevé que celui de la flamme pure, la diminution de diathermasie du verre, de la sélénite et de l'alun, en passant de la première à la seconde source calorifique, ne ferait que confirmer l'opinion énoncée. Mais ce raisonnement ne saurait plus se soutenir aujourd'hui, puisque nous voyons la diathermasie du soufre, du mica noir et du verre noir augmenter, au lieu de diminuer, dans les mêmes conditions de l'expérience. En d'autres termes : que la température s'élève ou s'abaisse lorsqu'on introduit la spirale de platine dans la flamme alcoolique, il n'en est pas moins vrai qu'en passant de l'une à l'autre source de chaleur certains corps augmentent leur transmission calorifique, tandis que d'autres la diminuent. Ainsi il ne saurait y avoir aucune relation numérique entre la température de la source rayonnante et la quantité de chaleur transmise. Les variations opposées que manifestent les deux groupes de corps mentionnés dans notre tableau fournissent donc une démonstration évidente, irréfragable, que la quantité de chaleur immédiatement tran-

smise par les lames diathermiques n'augmente pas *néces-sairement* avec la température de la source, mais qu'il existe au contraire des cas où elle diminue lorsque la température de la source augmente.

Remarquons que le groupe des corps sur lequel on avait observé une diminution, en passant de la radiation de la flamme d'alcool à celle du platine incandescent, se comporte de la même manière lorsque cette dernière source de chaleur est remplacée par la flamme d'huile, pendant que l'autre groupe continue de son côté à marcher en sens contraire. Il est évident que les considérations relatives au manque de proportionnalité entre la température de la source et la quantité de chaleur transmise trouvent ici une nouvelle application. En effet, la flamme de la lampe de Locatelli brûlant le charbon *à blanc* possède une température plus élevée que le platine maintenu à la simple *chaleur rouge;* cependant, l'on trouve des corps qui transmettent plus les rayons de la première source que ceux de la seconde, tandis qu'il y en a d'autres dont la transmission est plus grande pour la seconde source que pour la première.

Et il ne faut pas croire ces faits, si importants pour la science de la thermochrôse, vagues, incertains, ou difficiles à observer; car ils sont, au contraire, d'une netteté remarquable, sûrs, et faciles à reproduire par tous ceux qui possèdent un appareil thermo-électrique. Si l'on opère toujours sous une action capable de donner 30 degrés au galvanomètre lorsque le rayonnement tombe directement sur la pile, et qu'après avoir noté les deux déviations correspondantes aux interpositions successives d'une lame de mica noir et d'une lame de verre incolore, on passe de la première à la troisième source, le gal-

vanomètre indiquera une transmission plus petite de 4 à 6 degrés pour la première lame, et plus grande de 8 à 12 degrés pour la seconde ! Or, il est clair que de semblables différences ne sauraient échapper à l'œil de l'observateur le plus maladroit, ou le moins exercé dans ce genre de recherches.

La présence de plusieurs corps cristallisés parmi les substances, dont se composent les diverses lames mentionnées dans les tableaux que nous venons d'examiner, avait induit certains minéralogistes à penser que le sens suivant lequel étaient taillées les lames par rapport aux axes optiques ou cristallographiques, pouvait bien avoir une grande influence ; de manière que le passage du calorique rayonnant fût plus abondant dans telle direction du cristal que dans telle autre. Il était facile de prévoir que les choses ne devaient et ne pouvaient nullement se passer ainsi ; car la transmission calorifique a lieu, non seulement dans les corps cristallisés, mais aussi dans ceux qui sont privés de toute espèce de cristallisation, tels que le verre, l'ambre, la gélatine, le sucre fondu, et les liquides. Cependant, pour ôter tout scrupule à cet égard, je fis tailler sur un beau cristal de roche trois lames parfaitement égales, qui furent ensuite portées au même degré de poli ; la première était coupée perpendiculairement à l'axe; la seconde parallèlement à l'une des faces latérales; la troisième inclinée sur elle de 45 degrés. Ces lames donnèrent toutes 52 centièmes de chaleur immédiatement transmise. Le spath d'Islande a fourni des résultats analogues à M. Knoblauch.

J'ajouterai que le type, ou système auquel appartiennent les diverses formes d'une substance cristallisée, et

la facilité ou la régularité de leurs clivages, n'exercent également aucune influence sur les proportions de chaleur transmise. Pour en être convaincu il suffit d'observer que le sel gemme et l'alun, placés aux extrémités des échelles de transcalescence, appartiennent tous les deux au système cubique, et que des cristaux faciles à diviser, ou bien totalement privés de clivage, tels que le sel gemme et la sélénite, le soufre et l'alun, se trouvent indistinctement classés parmi les corps doués du *maximum* ou du *minimum* de diathermasie.

Si la transmission calorifique ne dépend, ni de la forme, ni de la texture des corps cristallisés, ni du sens de la coupe des lames par rapport aux axes cristallographiques, elle ne saurait non plus se rattacher à la nature ou à l'état des substances explorées. Effectivement, quel rapport pourrait-il y avoir entre la composition chimique, la solidité ou la fluidité d'un corps, et la transmission calorifique, puisque le phénomène est parfaitement semblable à la transmission lumineuse, et que celle-ci se rencontre dans toutes les classes et dans toutes les subdivisions physiques ou chimiques de la nature? N'avons-nous pas des substances diaphanes simples et composées, organiques et inorganiques, neutres, acides ou alcalines, solides, liquides ou aériformes?

D'ailleurs, indépendamment des analogies, l'expérience directe a résolu la question pour la chaleur aussi bien que pour la lumière, car la diathermasie s'étend, comme la transparence, à toute sorte de corps. Très-probablement, les conditions qui déterminent son existence sont entièrement analogues à celles de la diaphanéité. Pourquoi dans certains cas la matière pondérable se laisse-t-elle traverser

par toute sorte de lumière ? Pourquoi en d'autres circonstances n'est-elle perméable qu'à certaines couleurs ? Qu'on nous révèle d'abord les causes de ces phénomènes, beaucoup plus vulgaires puisqu'ils tombent journellement sous nos yeux, mais tout aussi mystérieux que les propriétés des corps relatives à la transmission de la chaleur rayonnante ; alors on aura acquis le droit de nous demander l'origine de la diathermasie et de la thermochrôse.

En terminant l'exposition de ces notions générales sur le passage de la chaleur rayonnante à travers les corps, nous devons remarquer que les principaux faits de la transmission calorifique par les substances solides et liquides s'obtiennent aisément avec les thermomètres à air ; en sorte que les personnes qui assistent à un cours de physique peuvent les observer en même temps de plusieurs côtés de la salle, et à une certaine distance des appareils.

Pour cela on prend une feuille assez ample de cuivre ou de fer blanc ; on la perce à son centre d'une ouverture circulaire de 12 à 15 millimètres de diamètre, et on soude, à une petite distance au-dessous de cette ouverture et perpendiculairement au plan de la feuille, une petite bande de 7 à 8 millimètres de largeur, et de 15 à 20 millimètres de longueur, destinée à servir de soutien aux lames que l'on veut soumettre aux expériences. L'écran, ou feuille métallique, ainsi arrangé, se fixe verticalement sur un pied, la bandelette horizontale au-dessous de l'ouverture. On dispose ensuite, d'un côté la source de chaleur, de l'autre un thermomètre à air construit avec de l'alcool fortement coloré en rouge, à boule noircie, muni de son enveloppe métallique et d'une graduation visible à quelque

distance. Quel que soit le fait que l'on veuille mettre en évidence, les centres de la source, de l'ouverture, et de la boule thermoscopique doivent toujours se trouver dans un même plan de niveau.

S'agit-il de montrer que certains corps solides sont réellement susceptibles de transmettre les radiations de la chaleur obscure, en leur conservant la forme rayonnante pendant leur trajet à travers le milieu solide et au-delà? On approche une source de chaleur obscure à quelque distance de l'écran, on bouche l'ouverture par une plaque de sel gemme, et l'on intercepte l'accès du rayonnement calorifique sur le sel au moyen d'une lame métallique. Tandis que la plaque de sel gemme est ainsi abritée, on fait dévier le thermomètre de 30 à 40 degrés hors de la ligne qui passe par les centres de la source et de l'ouverture, en ayant soin de le tenir constamment tourné vers la lame de sel, puis on rétablit la communication calorifique; la colonne liquide se tient parfaitement immobile, et reste encore dans le même état si on tourne la plaque de sel sur elle-même, de manière à ce qu'elle regarde en face le réservoir du thermomètre. Mais lorsque ce réservoir est poussé sur l'axe de la radiation, on voit aussitôt la colonne s'abaisser avec force, quelle que soit la position de la lame.

Ayant ainsi donné aux élèves une preuve irréfragable de l'existence de la transmission calorifique rayonnante dans les corps solides, on pourra les convaincre, par des méthodes analogues, que les substances parfaitement limpides possèdent des degrés très-différents de diathermasie, et que certains corps complétement opaques sont doués d'une véritable diathermasie qui est quelque-

fois supérieure à celle des milieux les plus diaphanes et les plus incolores. On pourra aussi leur prouver l'existence de la thermochrôse dans les substances privées de toute coloration apparente, en soumettant successivement une lame de verre, de sélénite ou d'alun à diverses qualités de chaleur. Si l'on parvient à se procurer plusieurs thermomètres à air d'une sensibilité à peu près égale, on abrégera de beaucoup ces démonstrations.

En effet, il n'y a qu'à ployer une feuille de cuivre ou de fer blanc en segment cylindrique, d'une faible courbure, et la disposer de manière à ce qu'elle se tienne dans une position verticale, après y avoir percé sur la ligne mitoyenne une rangée horizontale de cinq à six ouvertures égales, munies de petits supports à plaques, et éloignées entre elles de quelques centimètres. Contre la première de ces ouvertures, du côté de la convexité de l'écran, on appliquera une lame de sel gemme; contre la seconde une lame de verre; contre la troisième, une lame d'alun ou de sélénite de même épaisseur que le verre; la quatrième se bouchera par une lame de mica noir opaque ou par une plaque fort mince, et parfaitement opaque, de verre noir; la cinquième enfin, se fermera par une lame de cuivre soigneusement noircie sur ses deux faces. Les cinq plaques seront couvertes, du côté intérieur de la concavité, par une seconde feuille ou écran de métal, de mêmes forme et dimensions que l'écran qui les soutient; puis, on fixera à la hauteur des cinq ouvertures et sur l'axe de la surface cylindrique où elles sont percées, une spirale assez volumineuse de platine, (15 à 20 millimètres de base, 20 à 25 de hauteur), que l'on rendra incandescente avec la flamme d'une lampe à alcool

placée en-dessous. Après avoir disposé, à une distance de 3 à 4 centimètres, un thermomètre à air, muni de son armure métallique derrière chacune des cinq lames, et avoir marqué les hauteurs où se tiennent les extrémités des cinq colonnes liquides, on ôtera la feuille intérieure. Un abaissement considérable s'observera alors dans le thermomètre qui regarde la plaque de sel gemme; celui de la plaque de verre s'abaissera beaucoup moins; les thermomètres de l'alun et du métal noirci resteront complétement immobiles; tandis que le thermomètre du mica ou du verre noir opaque descendra de quelques degrés.

Pour éloigner tout soupçon que de pareilles inégalités de marche proviennent de la différente sensibilité des thermomètres à air employés, on arrêtera la communication calorifique par l'interposition de l'écran, et l'on échangera les thermomètres, de telle sorte que les immobiles occupent les places de ceux qui viennent de donner la plus grande action. Puis, on établira de nouveau la communication calorifique, et on trouvera que les rôles des instruments sont renversés, ceux qui marchaient le plus se tenant alors immobiles, et vice versâ; mais ces indications seront encore à très-peu de chose près les mêmes que tantôt, par rapport aux lames qui bouchent les cinq ouvertures; car le thermomètre placé vis-à-vis du sel sera toujours celui qui marche le plus, et ceux qui se trouvent en face de l'alun et de la lame métallique noircie resteront encore parfaitement immobiles, comme dans le cas précédent.

Ainsi, les actions observées proviennent réellement de la diathermasie plus ou moins grande de ces substances; elles ne sont pas dues à l'échauffement des plaques, puisqu'il y en a deux qui ne donnent aucun effet appréciable, et que

l'une d'elles est intérieurement composée d'un des meilleurs conducteurs du calorique, et couverte d'une substance douée du plus grand pouvoir absorbant et émissif. Le verre noir transmet donc immédiatement une certaine proportion de la chaleur incidente et constitue un véritable milieu diathermique, malgré son opacité complète ; le verre diaphane, qui surpasse en limpidité les plus beaux échantillons de sel gemme, transmet cependant une quantité de chaleur beaucoup moindre; et l'alun, qui est tout aussi limpide que le sel, intercepte totalement la radiation calorifique de la source.

Pour montrer que ni l'opacité calorifique de l'alun ni la transcalescence du verre ne sont des propriétés absolues, indépendantes de la nature de la radiation incidente (comme la transmission constante du sel gemme pour toute sorte de chaleurs rayonnantes, et la constance de l'adiathermasie dans la lame métallique noircie), il n'y a qu'à substituer successivement à la spirale de platine portée au rouge, une forte lampe à huile, puis un petit boulet de fer chauffé au-dessous de l'incandescence. Dans le premier cas, on voit le thermomètre de l'alun donner quelques signes de chaleur ; dans le second, le thermomètre du verre ne bouge pas plus que celui de l'alun. Mais le sel gemme déprime toujours avec force la colonne liquide de son thermomètre, et la lame de métal noirci ne donne jamais le moindre signe de transmission calorifique.

Lorsqu'il ne s'agit pas d'opérer devant un nombreux auditoire, on peut employer avec succès des thermomètres différentiels, dont les tubes de verre soient fort minces et les boules assez réduites en volume pour que le faisceau de chaleur *émergeant* d'une plaque de petites dimensions, puis-

se occuper toute la largeur des tubes métalliques qui leur servent d'enveloppe. Alors il devient fort aisé d'avoir des lames adaptées aux expériences, et l'appareil thermoscopique, se trouvant à l'abri des variations de la température et de la pression atmosphérique qui rendent si chanceux l'usage des thermomètres à air, se conserve toujours prêt à agir.

Muni de l'un de ces instruments et des sources constantes de chaleur mentionnées dans le second chapitre, les directeurs ou conservateurs de collections minéralogiques auront tout ce qui est nécessaire pour vérifier sur les substances diathermiques naturelles les principaux faits de la transmission calorifique, et les répéter à volonté devant un certain nombre de spectateurs. Il est presque superflu d'ajouter que leurs démonstrations deviendraient encore plus nettes et plus expéditives, s'ils possédaient un des appareils thermo-électriques que nous avons décrits page 159 et suivantes (14).

(14) Outre les propriétés physiques indispensables à la classification, telles que la forme cristalline, la densité, le clivage, etc. les auteurs de minéralogie ont compris la nécessité de prendre en considération les effets divers que la lumière, la chaleur, la pression ou le contact des fluides produisent sur un certain nombre d'espèces minérales. Aussi trouve-t-on aujourd'hui dans leurs ouvrages des notions fort étendues, non seulement sur le pouvoir réfringent, le polychroïsme, les couleurs des lames minces, la double réfraction et la polarisation, mais encore sur les variations de dilatabilité et d'élasticité dans les divers sens des cristaux, et sur les phénomènes électriques que la compression développe dans le spath d'Islande, et la chaleur dans la tourmaline. Ne serait-il pas temps d'y inscrire aussi les énormes différences qui s'observent entre les transmissions calorifiques des corps doués de la plus grande limpidité, tels que le sel gemme, le spath fluor, le cristal de roche, la sélénite et l'alun? Ne conviendrait-il pas de faire connaître à l'étu-

§. 2.

Influence de l'épaisseur des plaques.

Jusqu'ici nous n'avons considéré l'épaisseur des lames soumises aux expériences que d'une manière incidente et lorsqu'il s'agissait des relations qui existent entre la qualité de la source rayonnante et la transmission des milieux diathermiques. En étudiant cet élément d'une manière spéciale nous y trouverons des données extrêmement précieuses qui jettent le plus grand jour sur le phénomène que nous avons désigné sous le nom de thermochrôse, et montrent sous son véritable aspect la cause des énormes différences que l'on observe entre des couches de diverses matières, également épaisses et également limpides, sous le rapport de la quantité de chaleur qui les traverse en conservant sa forme rayonnante.

Remarquons, en premier lieu, que si, par un changement d'épaisseur, on peut faire varier dans le sel gemme la valeur

diant de minéralogie que l'alun et l'eau, malgré leur transparence parfaite, interceptent totalement les radiations des sources de chaleur obscure et sont beaucoup moins perméables aux radiations des corps incandescents et des flammes les plus brillantes que le cristal de roche enfumé et certaines lames complétement opaques de mica ? Ne serait-il pas convenable enfin de classer, parmi les propriétés physiques les plus remarquables des minéraux, la transmission constante du sel gemme pour toute sorte de rayonnement calorifique, ainsi que le passage immédiat, instantané, de la chaleur rayonnée par un récipient rempli d'eau bouillante, et même par l'épiderme du corps humain, à travers cette même substance, le spath fluor et le soufre?

absolue de la transmission lorsqu'on opère sur des pièces plus ou moins pures, *jamais* on ne parvient à altérer la constance de la proportion de chaleur transmise par la même lame de sel exposée successivement aux différentes espèces de rayons. Pour en donner un exemple, je citerai un beau cristal de cette substance athermochroïque que je conserve encore dans mes collections. Sa longueur est de 125 millimètres entre les deux faces parallèles et polies; sa transmission de l'une à l'autre de ces faces n'est plus 92, 3 comme dans les plaques moins épaisses, à cause des points nébuleux et autres défauts d'homogénéité qu'on rencontre toujours répandus, çà et là, sur des morceaux d'une épaisseur considérable, mais il fournit la même transmission de 71 centièmes de la quantité de chaleur incidente. tant pour le rayonnement de la flamme, que pour celui des corps chauffés au-dessous de l'incandescence. Si l'on opère successivement sur plusieurs morceaux de sel plus ou moins épais et tout à fait limpides, on obtient en même temps, et la constance de la transmission dans chaque pièce exposée aux différentes sources de chaleur, et l'égalité des transmissions sous l'action de la même source, lorsqu'on passe de l'une à l'autre pièce. Alors les plaques très-pures de sel gemme transmettent constamment 92,3 pour toute sorte de sources et pour toute sorte d'épaisseurs. Cette constance ne se vérifie expérimentalement que pour des lames épaisses de un à deux centimètres environ, parce que les échantillons de sel très-pur ne s'étendent pas ordinairement au-delà d'une telle limite, et parce que, lors même qu'on trouverait des masses plus considérables de cette substance douées de la plus grande pureté, elles commenceraient à agir uniformément sur tous les éléments du flux calorifique,

comme cela arrive dans la transmission de la lumière à travers le verre, l'eau et tout autre milieu incolore d'une certaine étendue.

Les choses se passent d'une manière bien différente à l'égard des milieux thermochroïques, car pour chacun d'eux les différences de transmission de l'une à l'autre source diminuent rapidement avec l'épaisseur de la lame, surtout lorsqu'on arrive à une certaine limite. Prenons pour exemple le verre: trois lames de cette substance d'épaisseurs décroissantes, exposées à nos quatre sources de chaleur, ont donné les résultats suivants.

ÉPAISSEURS DES LAMES EN MILLIMÈTRES	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES DU VERRE ORDINAIRE sur 100 rayons de chaleur provenant			
	de la lampe de Locatelli	du platine incandescent	du cuivre à 400°	du cuivre à 100°
2, 6	39	24	6	0
0, 5	54	37	12	1
(*) 0, 07	77	57	34	12

La proposition ci-dessus énoncée ressort avec la dernière évidence de la simple inspection du tableau. En effet le rapport de transmission de la seconde à la première source de chaleur, qui était **100 : 163** pour la lame de 2, 6 d'épaisseur, devient **100 : 135** pour la lame de 0,07. Le rapport de transmission de la troisième à la première source, qui était 100:650 pour la même lame de 2,6, devient 100:226 pour la lame de 0,07. Enfin le rapport

(*) *Cette lame était en verre soufflé.*

de transmission de la quatrième à la première source, qui était incommensurable pour la lame de 2,6, devient 100:642 quand il s'agit de la lame de 0,07.

En opérant sur d'autres milieux thermochroïques, on obtient des résultats tout à fait analogues. Voici, comme second exemple, la chaux sulfatée cristallisée.

ÉPAISSEURS DES LAMES EN MILLIMÈTRES	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES DE LA CHAUX SULFATÉE sur 100 rayons de chaleur provenant			
	de la lampe de Locatelli	du platine incandescent	du cuivre à 400°	du cuivre à 100°
2,6	14	5	0	0
0,4	38	18	7	0
0,01	64	51	32	21

Ce qu'il y a de plus frappant dans ces expériences, c'est de voir paraître, à une certaine épaisseur, des transmissions qui n'existaient pas à une épaisseur plus grande. Ainsi les rayons de la quatrième source, totalement interceptés dans le verre par une épaisseur de 2,6 commencent à se montrer au-dessous de cette limite. Les rayons de la troisième source, interceptés par une épaisseur de 2,6 de chaux sulfatée, sont déjà sensibles lorsqu'on atteint une épaisseur de 0,4; et les rayons de la quatrième source, qui sont encore interceptés par la chaux sulfatée à cette dernière limite d'épaisseur, se montrent très-nettement, lorsque cette substance a atteint une épaisseur de 0,01.

Une autre conséquence extrêmement remarquable de ces

expériences consiste dans l'inversion de l'ordre des diathermasies par une réduction convenable d'épaisseur dans l'une des deux lames. La chaux sulfatée, par exemple, transmet beaucoup moins que le verre à l'épaisseur de 2,6, puisque les quatre transmissions de cette dernière substance sont. 39. 24. 6. 0;
et celles de la sélénite. . . . . . 14. 5. 0. 0.

Mais en amincissant la lame de chaux sulfatée au point de rendre son épaisseur égale à 0,4, les transmissions de cette substance deviennent. . . . . 38. 18. 7. 0; valeurs à peu près égales à celles du verre, excepté pour le second rayonnement dans lequel la sélénite transmet un peu moins. En réduisant enfin cette lame jusqu'à 0, 01, les transmissions de la sélénite deviennent : 64. 51. 32. 21, et surpassent alors de beaucoup la diathermasie de 2, 6 millimètres de verre, à l'égard des quatre espèces de chaleurs incidentes.

Que conclure de tout cela ? Évidemment, que les interceptions des diverses qualités de chaleur qui produisent dans les milieux thermochroïques des différences si considérables, soit entre les transmissions d'une seule lame successivement exposée aux radiations de plusieurs sources diverses, soit entre les transmissions de diverses lames exposées au rayonnement d'une seule source, n'ont pas lieu à la surface, mais *dans l'intérieur même des substances diathermiques*, de manière que si l'on pouvait rendre ces substances assez minces, les effets de la thermochrôse disparaîtraient, et tous les corps donneraient une transmission constante et égale à celle du sel gemme.

Les corps doués d'un haut degré de diathermasie, comme le soufre et le spath fluor, par exemple, doivent être

les premiers à atteindre cette limite d'athermochrôse; mais on ne peut les réduire en lames fort minces et polies, à cause de leur structure vitreuse ou douée d'un clivage tendant à les briser en tout petits morceaux. Si l'on veut tâcher de vérifier la conclusion à laquelle nous venons d'arriver, il faut donc avoir recours aux substances cristallisées moins fragiles et capables de se diviser spontanément en feuilles très-minces douées de leur poli naturel ; or ces substances sont en fort petit nombre et très-peu diathermiques ; elles ont, par conséquent, leur limite d'athermochrôse beaucoup plus reculée que les autres, ce qui nécessite l'emploi de lames très-minces pour atteindre le but que nous avons en vue. En employant un de ces cristaux susceptibles de se partager en feuilles d'une grande exiguïté, on obtient toutefois des nombres qui se rapprochent déjà suffisamment entre eux et de la proportion de chaleur transmise par le sel gemme : ce cristal c'est le mica.

Les lames de mica donnent à peu près les mêmes transmissions que les lames de sélénite, lorsqu'elles ont une épaisseur d'un demi-millimètre ; mais si on en détache des feuilles excessivement minces, celles-ci fournissent des transmissions qui surpassent toutes celles des autres corps, le sel gemme excepté. En même temps la chaleur des sources obscures, qui était entièrement absorbée par la lame d'un demi-millimètre, traverse ces feuilles en proportion très-considérable; toutes ces quantités s'approchent de la transmission du sel gemme, surtout celles qui sont relatives aux sources de haute température.

Voici, par exemple, les résultats que m'a fournis une

lame incolore de mica exposée aux quatre rayonnements des sources que nous avons indiquées.

86. 85. 61. 46.

Une autre lame de la même substance, légèrement colorée en rouge, m'a donné

89. 89. 72. 69.

Ainsi, tout nous porte à croire que les transmissions des milieux thermochroïques tendent à la limite d'intensité représentée par la valeur constante de la transmission du sel gemme; cette limite se trouve seulement plus ou moins rapprochée de la surface, selon la nature du corps.

Maintenant, comme l'épaisseur plus ou moins grande des lames, parfaitement pures, de sel gemme n'exerce aucune influence sur la quantité de chaleur transmise, il s'en suit que les radiations calorifiques ne subissent dans l'intérieur de cette substance aucune absorption appréciable. Donc la différence entre la quantité de chaleur incidente et la quantité de chaleur transmise, savoir 100 — 92,3 = 7, 7, est due à la seule réflexion de la chaleur aux deux surfaces de la lame (15).

(15) Après avoir subi une première réflexion à la surface d'entrée, les rayons incidents pénètrent dans l'intérieur, éprouvent une seconde réflexion sur la surface opposée et sortent de la lame. Les rayons de la seconde réflexion retournent sur leurs pas, se réfléchissent en partie de nouveau, mais intérieurement, sur la surface antérieure, reprennent la direction initiale, et se réfléchissent encore partiellement à la surface postérieure; le reste sort et se confond avec le faisceau de la transmission principale. Les rayons trois fois réfléchis intérieurement subissent une quatrième réflexion intérieure sur la surface d'entrée, et sortent en partie du côté opposé, comme les précédents, et ainsi de suite.

La perte 7,7 que les 100 rayons incidents éprouvent en traver-

De plus, la constance de transmission du sel gemme pour les radiations des différentes sources, montre que

sant une plaque de sel gemme, résulte donc d'une infinité de réflexions, et les 92,3 rayons émergents se composent du *faisceau principal* de la chaleur transmise, et d'une infinité de *faisceaux secondaires* qui viennent s'y ajouter en vertu de ce nombre infini de réflexions effectuées entre les deux surfaces de la plaque. On démontre par le calcul que les faisceaux secondaires sont des quantités très-petites et qui peuvent être négligées relativement au faisceau principal. Mais comme la même vérité résulte aussi de l'expérience, nous allons voir, par cette voie beaucoup plus directe, comment on peut s'assurer que les rayons, qui viennent s'ajouter au faisceau principal après chaque double réflexion secondaire, sont insensibles aux thermomultiplicateurs les plus délicats, et peuvent, par conséquent, se négliger dans les calculs relatifs aux phénomènes de transmission et de réflexion que présente une lame exposée à un rayonnement calorifique.

A cet effet, il suffit de disposer une plaque de sel gemme comme dans les expériences ordinaires de transmission. La plaque sera très pure, la source calorifique intense, l'ouverture de l'écran petite. Après avoir attendu que l'index de l'instrument se soit fixé dans la position voulue par l'action de la chaleur transmise sous l'incidence perpendiculaire, on inclinera doucement de 15 à 20 degrés la plaque, en employant pour cela le bout d'une longue tige, et en prenant toutes les précautions nécessaires pour que le rayonnement de la main ou de tout autre partie du corps ne vienne pas frapper, directement ou par réflexion, la pile thermoscopique; l'index conservera exactement sa position, malgré cette évolution de la lame. Or, l'inclinaison sépare les rayons réfléchis des rayons transmis, car ceux-ci continuent leur chemin selon la direction initiale, ceux-là sont rejetés latéralement et ne viennent plus s'ajouter, comme tantôt, au faisceau de chaleur qui va frapper le thermoscope; donc les réflexions secondaires n'ont aucune action appréciable sur nos instruments.

L'immobilité de l'index, lorsqu'on incline légèrement la lame, prouve encore que la réflexion se fait avec une intensité sensiblement égale

les diverses espèces de chaleur éprouvent à la surface de ce milieu des réflexions sensiblement égales.

ponr les rayons perpendicnlaires et pour les rayons inclinés de 15 à 20 degrés ; car, si les derniers se réfléchissaient davantage, comme nons verrons bientôt qne cela arrive effectivement an-delà de cette limite (chap. IV §. 7), ils agiraient dans le même sens des réflexions secondaires, snpposées sensibles, et feraient ainsi diminner l'indication dn thermoscope lorsqn'on passe de la direction normale à la direction obliqne, ce qni n'a pas lien, ainsi qne nons venons de le voir.

La nullité de l'inflnence des réflexions secondaires nne fois établie, il n'y a rien de plus facile que de déterminer les valenrs propres de chacnne des réflexions qni s'effectnent snr les deox côtés opposés de la lame de sel gemme. En effet, soit R la réflexion ponr l'unité de chaleur incidente, 1—R sera la qnantité qni pénétrera dans l'intérienr de la lame, et R (1—R) la réflexion qoe celle-ci éprouvera sur la surface postérieure ; car l'absorption du sel étant nulle, toute la quantité 1—R arrive à la seconde snrface et s'y réfléchit dans le rapport de R:1. Or, la somme des denx réflexions ajoutée à la quantité transmise 0,923, doit reprodnire la quantité de chalenr incidente qne nous snpposons égale à l'nnité. On aura donc l'équation

$$R + R(1-R) + 0,923 = 1$$

d'où l'on tire

$$R = 1 \pm \sqrt{0,923} = 1 \pm 0,9607.$$

Le premier signe dn radical condnisant à un résultat absnrde dans le cas qni nous occnpe, doit être rejeté. La réflexion à la snrface antérieure de la lame sera donc

$$1 - 0,9607 = 0,0393.$$

Snbstitnant cette valeur dans l'expression R (1—R), on obtient 0,0377, qnantité qni représente la réflexion à la seconde surface de la lame.

Retenons donc qne, ponr 100 rayons incidents snr une lame de sel gemme, 3,93 sont réfléchis à la surface antérienre, et 3,77 à la snrface postérienre. La somme de ces deux qnantités doit reprodnire, et reprodnit en effet, le nombre 7,7, que nous avons déterminé en soustrayant la quantité de chalenr transmise, de la qnantité de chaleur qni arrivait librement sur le thermoscope avant l'interposition de la lame.

Or s'il est vrai, comme nous le supposons, que les différences de transmission des autres corps proviennent d'une force absorbante intérieure, il faudra que toutes les lames diathermiques donnent des réflexions sensiblement égales à **7,7**, quelle que soit leur composition. Nous allons voir par quel heureux concours de circonstances on parvient à démontrer expérimentalement la vérité de cette proposition, et à établir ainsi sur des bases inébranlables la théorie relative à l'absorption intérieure.

On trouvera dans les tableaux ci-après les résultats de plusieurs séries d'expériences que j'ai faites avec le plus grand soin sur les variations d'épaisseur et de transmission calorifique de cinq substances parfaitement homogènes, dont trois solides et deux liquides. Les épaisseurs des couches minces ont été mesurées au sphéromètre, les valeurs des transmissions déduites d'un grand nombre d'observations, et les relations entre ces deux éléments représentées par des formules qui fournissent les données de l'observation et tous les points intermédiaires. Ces expériences furent entreprises d'après l'invitation d'une commission de l'*Institut de France*, composée de MM. Arago, Biot, et Poisson. Les formules appartiennent à M. Biot ; elles sont insérées dans le **14me** volume des Mémoires de *l'Académie des Sciences de Paris* (dernière série) où chacun pourra les consulter ; je ne les rapporte pas ici, parce qu'elles résultent d'un enchaînement d'idées trop différent de l'ordre adopté dans cet ouvrage, pour que leur développement n'eût pas l'inconvénient de porter quelque confusion dans l'esprit du lecteur, ce que nous devons soigneusement éviter.

Cependant, comme nous nous privons ainsi volontaire-

ment de leur secours, et que les épaisseurs des lames, quoiqu'approchant beaucoup d'une série exprimée en nombres entiers ou en parties aliquotes du millimètre, n'atteignaient jamais exactement ces mesures à cause de la difficulté des réductions mécaniques, il fallait avoir recours aux méthodes d'interpolation ou à la construction graphique, pour obtenir les valeurs des transmissions correspondantes aux épaisseurs millimétriques précises. J'ai préféré le second moyen, qui a l'avantage de montrer immédiatement à l'œil les petites erreurs des observations, tout en fournissant la correction nécessaire avec un degré de précision suffisant pour ce genre de recherches; mais il m'a semblé convenable de rapporter d'abord les données expérimentales : les réductions géométriques viennent après.

Je ne décrirai point la méthode employée pour les corps solides, car elle ne diffère en rien de celle qui a été précédemment exposée. Mais les données relatives aux liquides exigent quelques explications.

Comme les transmissions calorifiques de ces milieux n'ont pu être observées qu'à travers deux plaques diaphanes, il fallait voir d'abord si l'intervention des verres minces dont ces plaques étaient composées, influait sur la quantité de chaleur transmise, et, dans le cas affirmatif, mesurer la valeur de cette influence. A l'égard de l'huile de colza, la solution du problème était fort simple, puisqu'il suffisait de substituer des lames de sel gemme aux lames de verre, et observer les différences; c'est aussi ce que l'on a fait, et l'expérience a démontré qu'au-delà de trois millimètres on obtenait exactement les mêmes transmissions dans les deux cas; de manière que, pour toutes les couches plus épaisses que trois millimè-

tres, on a pu se servir des lames de verre. Au-dessous de cette limite, la substitution du sel au verre ayant donné lieu à une petite augmentation, on a observé les transmissions à travers des lames de la première substance.

Quant à l'eau, des expériences préliminaires avaient établi que sa faible transmission calorifique ne souffrait aucune altération appréciable lorsqu'on y dissolvait des corps, qui, étant à l'état solide, donnent des transmissions énormément différentes; ainsi nous savons, par exemple, que, pour des épaisseurs de deux à trois millimètres, le sel gemme transmet neuf fois plus que l'alun sous l'action du rayonnement le plus transmissible par cette dernière substance, qui est celui de la flamme; et cependant *l'eau saturée de sel ou d'alun, étant soumise à la radiation de notre lampe, donne des transmissions sensiblement égales*, comme on peut le voir à la fin du tableau II (*).

Cela posé, on devine aisément le procédé que l'on a employé pour voir si les verres de nos récipients altéraient la quantité de chaleur transmise par l'eau. Au lieu d'eau pure on a pris de l'eau saturée de sel gemme. Alors la substitution du sel au verre a pu être opérée sans craindre que le liquide détruisît les plaques de son récipient pendant l'expérience. Mais quelque mince que fût la couche liquide, il n'y eut, entre les quantités de chaleur transmises par le système de l'eau pure et du verre, et par le système de la solution saline et du sel gemme, aucune différence appréciable; on en déduisit que toutes les expériences relatives à la transmission de l'eau pou-

(*) *Page* 165.

vaient s'accomplir avec les lames de verre mince sans aucune crainte que leur action absorbante altérât les résultats.

Il est presque superflu de faire remarquer que ces faits démontrent une diathermasie beaucoup plus faible dans l'eau que dans le verre. Je dirai cependant qu'*une couche d'eau d'un seul millimètre d'épaisseur suffit pour intercepter complétement la chaleur des corps chauffés au-dessous de l'incandescence* (16).

Quoique la transcalescence de l'huile de colza soit supérieure à celle de l'eau, elle est toutefois inférieure à la diathermasie du verre, notamment pour les sources à basse température, qui fournissent des transmissions trop faibles pour être mesurées avec le degré convenable de précision. Voilà pourquoi on a dû supprimer, pour les liquides, les expériences relatives à la troisième source.

Au reste les diathermasies des diverses couches d'eau ou d'huile de colza, relativement aux radiations de la lampe Locatelli et du platine incandescent, ainsi que les diathermasies du verre et du cristal de roche limpide et enfumé pour le rayonnement de ces mêmes sources calorifiques et du cuivre chauffé à 400 degrés, sont indiquées numériquement dans les tableaux ci-après.

(16) On verra par les tableaux suivants qu'*un millimètre d'eau ne transmet que 4 parties sur 100 de la radiation du platine incandescent*.

Ces deux faits suffisent pour montrer l'absurdité des *théories* qui font dépendre de la chaleur rayonnée à travers l'eau le phénomène de la *caléfaction* de ce liquide sur les surfaces incandescentes, et la formation de la glace au fond des rivières.

EXPÉRIENCES RELATIVES AU VERRE DE St. GOBIN

ÉPAISSEUR des LAMES (en millimètres)	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES		
	pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent	pour le cuivre chauffé à 400°
0,196	82,51	. . .	. . .
0,244	81,06	. . .	. . .
0,314	80,21	. . .	. . .
0,323	. . .	68,35	17,01
0,575	77,00	59,78	13,60
0,814	74,48	54,63	11,13
1,094	72,75	50,25	9,35
1,600	70,00	45,23	6,30
1,974	68,17	43,50	5,07
2,097	67,83	42,51	4,75
2,666	66,13	39,43	3,43
2,877	65,48	38,62	3,10
4,121	63,34	35,23	2,02
5,640	61,34	32,45	1,38
6,230	60,66	31,52	1,25
8,274	59,00	29,17	1,15

EXPÉRIENCES RELATIVES AU CRISTAL DE ROCHE LIMPIDE

ÉPAISSEURS des LAMES (en millimètres)	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES		
	pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent	pour le cuivre chauffé à 400°
0,517	79,33	69,35	14,50
0,910	. . . .	66,25	12,00
1,033	. . .	64,88	11,08
1,174	75,96	64,01	10,60
1,933	73,40	60,78	8,75
2.843	72,00	57,90	7,50
3,792	71,02	55,88	6.75
5,023	70,40	53.35	6,25
5,936	69,89	51,38	5,38
7,155	69,58	49,50	4,87
8,122	68,82	48,20	4,50

EXPÉRIENCES RELATIVES AU CRISTAL DE ROCHE ENFUMÉ

ÉPAISSEURS des LAMES (en millimètres)	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES		
	pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent	pour le cuivre chauffé à 400°
0,364	82,96	71,25	17,50
1,238	77,16	63,55	10,97
1,705	75,84	61,12	9,90
2,010	75,21	60,37	9,10
3,478	72,34	56,25	7.42
4,468	70,77	53,62	6,67
86,000	59,02	35,00	0,65

EXPÉRIENCES RELATIVES À L'HUILE DE COLZA ÉPURÉE

ÉPAISSEURS des lames en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES	
	pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent
0,397	67,53	35,64
0,743	53,53	27,54
1,278	44,33	19,92
2,412	33,09	15,29
3,483	29,01	12,67
4,621	26,58	11,20
5,778	24,10	10,21
6,812	22,73	9,21
8,490	21,23	7,94
11,598	20,73	6,57
50,000	12,50	2,12
100,000	8,08	1,24
150,000	6,05	. . .
200,000	5,33	. . .

EXPÉRIENCES RELATIVES À L'EAU DISTILLÉE

ÉPAISSEURS des lames en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES	
	pour la lampe de Locatelli	pour le platine incandescent
0,397	27,03	10,00
0,743	21,94	7,20
1,278	17,38	4,13
2,412	12,62	2,53
3,485	10,47	1,67
4,621	9,42	1,28
5,773	8,71	1,02
6,812	8,46	0,82
8,490	7,91	0,45
11,598	7,63	0,10
50,000	2,39	0,00
100,000	1,28	0,00
150,000	0,71	0,00

TABLEAU IV.

ABSCISSES ET ORDONNÉES (*) MILLIMÉTRIQUES						
Épaisseurs en millimètres	VERRE de Saint-Gobin			CRISTAL de roche limpide		
	Lampe de Locatelli	Platine incandescent	Cuivre à 400°	Lampe de Locatelli	Platine incandescent	Cuivre à 400°
0,5	77,5	62,1	14,4	78,6	69,5	14,8
1,0	73,3	51,5	9,9	76,8	63,1	11,3
1,5	70,4	46,1	6,7	74,8	62,5	9,7
2,0	68,2	42,8	5,0	73,3	60,6	8,7
2,5	66,6	...	...	72,5	...	...
3,0	65,3	38,3	2,9	71,8	57,6	7,3
4	63,4	35,8	2,0	70,8	55,3	6,6
5	62,0	34,0	1,5	70,2	53,3	6,0
6	60,9	32,3	1,4	69,8	51,4	5,3
7	60,0	30,9	1,2	69,5	49,8	5,0
8	59,2	29,7	1,1	69,3	48,4	4,6
9	...	...	...	...	...	...
10	...	...	...	...	...	...
11	...	...	...	...	...	...
50	...	...	...	...	...	...
86	...	...	...	...	...	...
100	...	...	...	...	...	...
150	...	...	...	...	...	...
200	...	...	...	...	...	...

(*) *Il est manifeste que les abscisses sont les épaisseurs des cou-*

TABLEAU IV.

DÉDUITES DES RÉSULTATS PRÉCÉDENTS

CRISTAL de roche enfumé			HUILE de colza épurée		EAU distillée	
Lampe de Locatelli	Platine incandescent	Cuivre à 400°	Lampe de Locatelli	Platine incandescent	Lampe de Locatelli	Platine incandescent
81,7	70,0	13,4	64,0	32,0	23,1	8,7
78,6	65,0	12,3	48,3	22,8	19,3	5,7
...	...	...	41,0	18,7	16,0	4,2
75,1	60,3	9,1	36,1	16,3	13,9	3,2
...	...	...	32,7	...	...	...
73,1	57,4	7,8	30,6	13,6	11,4	2,0
71,4	54,8	7,0	27,8	12,6	10,0	1,5
...	...	...	25,7	10,8	9,1	1,1
...	...	...	23,9	9,8	8,6	1,0
...	...	...	22,6	8,9	8,2	0,8
...	...	...	21,8	8,1	8,0	0,6
...	...	...	21,2	7,5	7,8	0,5
...	...	...	21,0	7,1	7,7	0,4
...	...	...	20,9	6,7	7,7	0,3
...	...	...	12,5	2,1	2,4	0,0
59,0	35,0	0,7	...	...	...	...
...	...	...	8,1	1,2	1,3	0,0
...	...	...	6,1	...	0,7	0,0
...	...	...	5,3	...	...	...

ches liquides, *et les* ordonnées *les quantités de chaleur transmises.*

Suivons la marche de la chaleur dans l'intérieur de ces diverses substances, en nous appuyant pour cela sur les données rectifiées du tableau IV. Les rayonnements subissent d'abord une grande absorption, et décroissent rapidement dans les premières couches du milieu ; puis l'absorption diminue, et les rayons ne souffrent plus que des pertes très-faibles. Ainsi, dans le verre, la radiation de la lampe Locatelli perd 77,5–73,3, c'est-à-dire 4,2 en passant d'un demi-millimètre à un millimètre ; mais, arrivée à 7 millimètres, elle ne diminue plus que de 60–59, 2 ou 0,8 en parcourant un intervalle double, de manière que la perte du rayonnement pour un demi-millimètre de verre correspond alors à 0,4. Dans le cristal de roche, les pertes du rayonnement aux mêmes profondeurs du milieu sont 1,8 et 0,1 ; et il est facile de voir qu'elles décroissent encore plus rapidement dans l'huile de colza et dans l'eau. Or, ces pertes, déjà si petites entre 7 et 8 millimètres, le deviendront encore davantage à une plus grande profondeur, et atteindront alors une valeur tout à fait inappréciable à nos moyens thermoscopiques.

Qu'arrivera-t-il maintenant si, après avoir mesuré la transmission d'une plaque fort épaisse de verre, de cristal de roche, ou de tout autre masse bien homogène d'un milieu thermochroïque quelconque, on en détache une lame très-mince, et si l'on mesure de nouveau la transmission à travers l'ensemble des deux lames ? La transmission diminuera nécessairement, à cause de la réflexion qui aura lieu sur les deux nouvelles surfaces produites dans l'acte de la séparation; mais puisque l'absorption de la chaleur qui a déjà traversé toute l'étendue antérieure du milieu est insensible dans la petite lame détachée,

si l'on rapporte la transmission de celle-ci à l'intensité du rayonnement émergent de la grosse plaque on aura, par une simple soustraction entre la quantité de chaleur incidente et la quantité de chaleur émergente la valeur des deux réflexions. Or, nous étions arrivés tantôt à cette conséquence, que si les différences de transmission observées entre les corps diathermiques dérivent réellement des forces absorbantes intérieures (comme les valeurs des transmissions, rapidement croissantes dans les lames de toute nature à mesure que l'épaisseur diminue, nous avait induits à l'admettre), il faut que tous ces corps réduits en lames polies transmettent 92,3 et réfléchissent 7,7 sur 100 rayons de chaleur incidente; précisément comme cela arrive sur les lames de sel gemme. Nous voilà donc en mesure de vérifier l'exactitude de notre déduction.

Pour y parvenir de la manière la plus simple possible, coupons d'abord sur la substance qu'il s'agit de soumettre aux expériences une lame fort mince. Après avoir bien poli ses deux faces et celle de la grosse plaque qui l'a fournie, faisons passer le rayonnement calorifique à travers cette dernière plaque; approchons davantage la source afin de donner aux rayons émergents une intensité aussi grande que celle des radiations arrivant librement sur la pile thermoscopique dans les expériences ordinaires de transmission. Si notre supposition est vraie, la lame mince interposée sur le trajet du rayonnement, qui sort de la grosse plaque de même qualité, devra se comporter comme une lame de sel gemme; c'est-à-dire, qu'en interposant la lame mince ou une lame de sel, on verra la déviation de 35 degrés que possède l'index du rhéomètre *diminuer dans les deux cas de la même*

quantité; de manière qu'en calculant la transmission d'après la chute de l'index, la lame mince donnera 92,3 de chaleur transmise, et 7, 7 de chaleur réfléchie. Maintenant si on effectue l'expérience, on trouve que les choses se passent réellement ainsi, et cela pour toute sorte de substances diathermiques et pour toute sorte de rayons transmissibles en quantité suffisante par la grosse lame antérieure. Il n'est pas du tout nécessaire que celle-ci soit d'une épaisseur énorme ; deux à trois centimètres suffisent pour le verre, le cristal de roche, l'eau, l'alun, et presque toutes les substances thermochroïques incolores.

Les nombres que l'on obtient ainsi pour la transmission de la lame mince diffèrent bien quelque peu de 92,3 ; mais les différences sont très-petites, à peine arrivent-elles à quelques centièmes de l'incidence, et ne peuvent provenir que du différent degré de poli dont les corps sont susceptibles ou d'une petite variation dans le pouvoir réflecteur des milieux diathermiqnes, variation qui dépend, comme nous le verrons plus tard, de l'index de réfraction de chaque milieu (17).

(17) On parvient au même résultat, c'est-à-dire que l'on retrouve encore à très peu de chose près pour la somme des deux réflexions d'une plaque de verre, de cristal de roche ou de toute autre substance diathermique, le nombre 0,077, en comparant la quantité de chaleur transmise par une grosse lame avec celle qui traverse deux, trois, quatre ou un nombre quelconque de lames plus minces, formant ensemble un système de même épaisseur.

En effet, l'absorption que le rayonnement subit pendant la traversée étant parfaitement égale dans les deux cas, la différence que l'on observera entre les quantités de chaleur *a*, *b*, transmises par les deux systèmes proviendra uniquement du plus grand nombre de réflexions subies par les rayons qui traversent le groupe composé de plusieurs lames.

Ainsi, soit par les considérations précédemment exposées sur la limite 92,3 de transmission vers laquelle tendent toutes les substances diathermiques à mesure que

Pour exprimer algébriquement cette différence, et par suite le rapport $\frac{b}{a}$ *de la transmission multiple à la transmission simple*, on peut donc faire abstraction de la thermochrôse du milieu, et raisonner comme si les lames étaient formées d'une substance athermochroïque.

Faisons la quantité de chaleur incidente égale à l'unité, et représentons par r, r', les réflexions à la première et à la seconde surface de la lame isolée, ou de la première lame du système multiple. La chaleur qui pénètre dans le milieu sera $1-r$; sa réflexion à la seconde surface $(1-r)r'$, et par conséquent

$$(1-r)-(1-r)r'=1-r-r'+rr'=(1-r)(1-r')$$

représentera la chaleur émergente.

Cette quantité deviendra évidemment

$$(1-r)(1-r')-(1-r)(1-r')r$$

en pénétrant dans l'intérieur de la seconde lame du groupe multiple : elle souffrira une perte égale à

$$(1-r)(1-r')r'-(1-r)(1-r')rr'$$

en arrivant à la surface postérieure; et n'aura plus qu'une intensité représentée par

$$(1-r)(1-r')-(1-r)(1-r')r-(1-r)(1-r')r'+(1-r)(1-r')rr'=(1-r)(1-r')(1-r-r'+rr')=(1-r)^2(1-r')^2$$

en sortant de la seconde lame.

On trouvera par le même raisonnement qu'à la sortie de la troisième lame le rayonnement sera réduit à $(1-r)^3(1-r')^3$; et ainsi de suite : en sorte que si le groupe multiple contient un nombre n de lames, l'intensité de la radiation émergente de ce groupe sera,

$$(1-r)^n(1-r')^n$$

Et comme la chaleur qui sort de la lame unique est $(1-r)(1-r')$ on aura évidemment

$$(1-r)^{n-1}(1-r')^{n-1}$$

pour l'expression générale du rapport observé $\frac{b}{a}$; et par suite

l'épaisseur diminue, soit par le fait de la valeur commune 7,7 qu'atteint la réflexion de toute sorte de chaleur transmise aux deux surfaces de chaque lame, nous arrivons l'équation

$$(1-r)^{n-1}(1-r')^{n-1}=\frac{b}{a}$$

d'où l'on tirera, au moyen des tables de logarithmes, la valeur de $(1-r)(1-r')$ évaluée en nombres, c'est-à-dire la valeur numérique de l'intensité des rayons émergents de la grosse lame *dans le cas où le milieu n'eût exercé aucune absorption*. La chaleur perdue dans l'acte des deux réflexions sera donc

$$1-(1-r)(1-r')$$

Ce moyen d'obtenir la réflexion d'une plaque thermochroïque indépendamment de l'absorption, plus ou moins intense, que le rayonnement subit dans son intérieur, est évidemment susceptible d'un degré d'exactitude supérieur à celui que l'on peut prétendre de la méthode décrite ci-dessus. Car, la quantité cherchée y est déduite de la moyenne d'un nombre illimité de réflexions, et complétement indépendante de l'absorption du milieu; tandis que dans la méthode du texte, cette quantité résulte de la mesure directe des deux réflexions, et se trouve indispensablement affectée par l'absorption, très-petite il est vrai, de la lame mince placée derrière la lame épaisse.

Donnons maintenant quelques applications. Une plaque de verre de $8^{mm},159$ et six plaques de la même substance, formant ensemble une épaisseur de $8^{mm},274$, furent successivement soumises au rayonnement de la lampe Locatelli: la première transmit 23,35, les autres réunies dans un seul système 15,11. Ici l'équation générale

$$(1-r)^{n-1}(1-r')^{n-1}=\frac{b}{a}$$

devient donc

$$(1-r)^{5}(1-r')^{5}=\frac{1511}{2335}$$

qui étant résolue donne

$$(1-r)(1-r')=0,916$$

d'où,

$$1-(1-r)(1-r')=0,084$$

Une plaque de cristal de roche de $8^{mm},122$ et six plaques ayant

à la conséquence que les pertes si différentes que subissent les rayonnements des diverses sources en traversant un milieu thermochroïque donné, ou le rayonnement d'une seule source en passant au travers des différents milieux thermochroïques, ne proviennent pas d'une absorption ou dispersion superficielle, mais d'une *véritable force absorbante intérieure, répandue dans toute la masse du milieu.*

Cette force est en quelque sorte comparable à une espèce de crible qui retient certains rayons de chaleur, tout en laissant passer librement les autres. Voilà pourquoi elle opère avec une énergie dépendante de la nature de la source rayonnante, et pourquoi son action est d'autant plus intense qu'on s'approche davantage de la sur-

ensemble 8^{mm},604 d'épaisseur fournirent les transmissions 27,72 et 18,13 ; d'où l'équation

$$(1-r)^5 \ (1-r')^5 = \frac{1813}{2772}$$

de laquelle on tire

$$(1-r)(1-r') = 0,918$$

et

$$1-(1-r)(1-r') = 0,082$$

Les sommes respectives des deux réflexions d'une lame de verre et d'une lame de cristal de roche une fois connues, on obtiendra la valeur de la réflexion que le rayonnement éprouve, à la surface de ces corps, par la résolution de l'équation mentionnée dans la note précédente.

Dans le chapitre de la réfraction simple, on verra comment des expériences analogues à celles que nous venons de décrire, comparées aux réflexions que la lumière subit en pénétrant les substances diaphanes selon la direction de la normale fournissent en même temps un moyen très-précis de déterminer les indices de réfraction des rayons de chaleur, et l'une des preuves les plus convaincantes de la parfaite identité des deux agents qui produisent les phénomènes lumineux et calorifiques.

face d'entrée ; car les premières couches du milieu sont évidemment celles qui entrent d'abord en activité et exécutent pour ainsi dire cette espèce de triage entre les éléments du flux calorifique transmis.

Or, ces phénomènes d'absorption et de transmission fournis par les milieux thermochroïques, et notamment par toutes les substances diaphanes et incolores, le sel gemme excepté, sont exactement semblables aux phénomènes de transmission et d'absorption que présentent les milieux colorés par rapport à la lumière. Cette analogie complète, qui constitue l'un des faits les plus importants pour la théorie du rayonnement calorifique, peut être mise dans toute son évidence par des observations extrêmement simples.

Supposons que l'on regarde, au travers d'un verre coloré, des flammes de diverses couleurs ; elles paraîtront plus ou moins vives, selon la ressemblance de leurs teintes avec la couleur du verre. Si cette couleur est pure et que la flamme ne vibre aucun rayon de même teinte, alors la vision sera totalement interceptée, comme cela arrive en effet pour certains verres rouges en présence de certaines lumières vertes. N'a-t-on pas ici des apparences lumineuses tout à fait pareilles aux transmissions et aux interceptions calorifiques de nos lames de verre, de sélénite, d'acide citrique, d'alun, et autres substances incolores et thermochroïques exposées à nos quatre sources de chaleur ?

On connaît l'expérience des deux lames de verre en contact par une de leurs arêtes verticales, et formant entre elles un angle très-aigu, plongées ainsi disposées dans l'eau ou l'alcool coloré en rouge, afin de montrer

la courbe hyperbolique que forme le liquide soulevé en vertu des forces capillaires. Éloignons de notre pensée et la nature de cette courbe et les actions moléculaires dont elle dérive, et fixons uniquement notre attention sur la couleur que le liquide soulevé entre les deux lames affecte à différentes distances de l'arête de contact.

Commençons par l'ouverture de l'angle où la couche est plus épaisse.

D'abord la teinte se montre semblable à celle du liquide dans le réservoir, et égale à elle-même pendant un espace assez considérable : arrivé à une petite distance de l'arête on voit le liquide pâlir tout à coup, et devenir parfaitement incolore près de la ligne de contact des deux lames. Donc la quantité de lumière transmise par une petite tranche verticale de liquide, parallèle à l'arête de contact, et perpendiculaire au plan qui partage l'angle en deux parties égales, varie très-peu tant que la distance entre les deux verres est assez considérable. À une certaine limite d'épaisseur, la transmission lumineuse s'accroît rapidement, puisque la tranche liquide laisse alors passer, non seulement les rayons rouges, mais la lumière de toute couleur.

Ces deux faits nous représentent nos transmissions calorifiques, faibles et peu différentes pour les couches épaisses, abondantes mais différant d'une quantité notable pour les couches très-minces de chacun de nos milieux thermochroïques.

Enfin l'égalité de teinte que l'on observe entre deux tranches éloignées de l'arête de contact, malgré leurs épaisseurs différentes, prouve que l'absorption lumineuse devient sensiblement nulle, lorsque la lumière a préala-

blement traversé une étendue considérable du milieu coloré : voilà le fait analogue à notre expérience de la lame mince placée derrière la plaque épaisse de la même substance.

Il est clair qu'ici, comme dans le cas de la chaleur transmise par les milieux incolores, l'intensité de la force absorbante dépend de la qualité des rayons incidents, et qu'elle agit avec beaucoup plus d'activité près de la surface d'entrée, qu'à une certaine profondeur; ce qui justifie complétement la comparaison d'une sorte de triage lumineux, accompli dans les premières couches des milieux colorés avec le triage calorifique, accompli par les substances diaphanes privées de toute espèce de coloration.

§. 3.

Transmissions successives

Les nombreux détails, contenus dans les deux derniers paragraphes, prouvent clairement qu'il existe dans l'intérieur des milieux les plus limpides et les plus incolores, tels que le cristal de roche, le verre, l'eau, et l'alun, une force absorbante qui opère sur les rayons de chaleur comme le font les couleurs à l'égard des rayons de lumière. L'existence d'une telle force n'a pas été supposée d'après les règles d'une analogie plus ou moins hasardée ; mais elle résulte *nécessairement* de la parfaite ressemblance, je dirai presque de l'identité, de ses effets avec les actions lumineuses des milieux colorés. Cependant si on pouvait encore éprouver quelques difficultés à l'admettre, tous les doutes se dissiperont en présence des faits suivants.

Parmi les diverses espèces de verres verts répandues dans le commerce on en trouve une douée d'une teinte bleuâtre, qui est complétement imperméable au rayon rouge. Que l'on se procure une de ces lames, et une série de verres bleus, indigo, violets, orangés, jaunes, et rouges, plus une plaque bien pure d'alun, ou une couche d'eau comprise entre deux lames de verre. Alors ayant disposé l'un des verres colorés contre l'ouverture de l'écran on le fera traverser par la radiation de la lampe qu'il faudra rapprocher beaucoup de l'écran, afin d'obtenir une action bien prononcée de 20 ou 30 degrés, par exemple, sur le rhéomètre; puis on interposera la lame d'alun sur le passage des rayons émergents : l'index descendra vers le zéro, et s'arrêtera sur un certain arc, que nous supposerons de 8 ou 10 degrés. Maintenant changeons la lame colorée, éloignons ou rapprochons la lampe pour maintenir toujours l'index du rhéomètre à 20 ou 30 degrés en vertu de la chaleur transmise; interposons ensuite, comme tantôt, notre lame d'alun. Si le verre substitué au premier appartient à la série des lames bleu, indigo, violet jaune, orangé ou rouge, on verra l'index du rhéomètre se fixer encore à 8 ou 10 degrés environ, comme tantôt; mais si c'est le verre vert précédemment défini, non seulement l'aiguille indicatrice de l'instrument ne s'arrêtera pas à 8 ou 10 degrés, mais elle ne se soutiendra plus nulle part, et descendra jusqu'au zéro du cadran ; en sorte que la lame de verre vert et celle d'alun, qui étaient séparément perméables aux rayons de chaleur, forment par leur réunion un système adiathermique, c'est-à-dire un système imperméable à la chaleur rayonnante. Il est presqu'inutile d'ajouter que l'ordre de succession des lames n'a au-

cune influence sur le phénomène, de manière qu'en plaçant l'alun devant le verre vert, ou le verre vert devant l'alun, on arrête toujours, dans l'acte de l'accouplement de nos deux lames, le passage de la chaleur rayonnante. On obtient encore le même effet en substituant l'eau à l'alun, ou bien en plaçant l'un de ces deux corps derrière une lame opaque de mica noir ou de verre noir, substances qui malgré leur opacité transmettent, comme nous l'avons vu dans le premier paragraphe du présent chapitre, une quantité considérable des radiations calorifiques obscures contenues dans le rayonnement des corps incandescents. Ici, comme dans le cas du verre vert, on voit donc des substances *parfaitement limpides*, et perméables à une certaine proportion du flux calorifique soumis à l'expérience, intercepter les rayons provenant du même flux de chaleur, lorsque ces rayons sont préalablement transmis par un autre corps.

Cela bien entendu, prenons un verre d'un rouge pur, ne se laissant traverser que par la lumière de cette couleur, appliquons-le successivement derrière chacune des lames colorées de notre série et regardons la lampe à travers ces combinaisons binaires. La flamme nous paraîtra plus ou moins vive selon la qualité de la lame accouplée, mais toujours rouge, parce que le verre postérieur ne trasmettant que la lumière de cette teinte, ne nous permet de voir les objets à travers qu'en vertu des rayons rouges qui passent toujours en quantité plus ou moins grande par la lame antérieure. Arrivé à l'accouplement du verre vert, on sera d'abord extrêmement surpris de ne pas apercevoir la moindre trace de lumière. La flamme regardée à travers les lames séparées don-

naît deux images vives et brillantes, l'une verte, l'autre rouge, et ces mêmes corps diaphanes réunis forment un corps opaque ! . . . . Mais avec un peu de réflexion on comprend de suite que cela devait être ainsi, puisque la lame antérieure ne transmet point de lumière rouge, et que, de tous les autres rayons colorés qui la traversent, aucun ne peut passer par la lame postérieure.

Un phénomène tout à fait analogue se produit, lorsqu'on combine le verre jaune de chrôme avec une couche d'ammonio-sulfate de cuivre renfermée dans un récipient plat de verre incolore; car le verre teint en jaune par le chromate de plomb transmet bien, avec le jaune, d'autres rayons colorés, mais il intercepte le bleu qui est l'unique teinte transmise par la solution d'ammonio-sulfate de cuivre. En effet l'image d'une bougie allumée, qui paraît fortement colorée en bleu à travers la solution de cuivre et fortement colorée en jaune à travers le verre de chrôme, mais très-vive et très-brillante dans les deux cas, disparaît complétement lorsqu'on la regarde à travers les deux corps superposés, malgré l'impureté de la coloration du verre jaune.

L'opacité, résultant de l'ensemble de deux milieux colorés, se reproduit enfin dans toute sa simplicité, lorsqu'on accouple le verre rouge et la couche d'ammonio-sulfate de cuivre. Je dis, dans sa plus grande simplicité, parce qu'ici les deux teintes sont pures et ne livrent passage à aucune autre lumière qu'à celle de la couleur du milieu; en sorte que les rayons sortant du bleu ne peuvent traverser le rouge, ou vice versâ. Si, dans toutes ces expériences, on substituait à l'un des milieux colorés, de l'eau, du verre, ou un cristal limpide sans aucune trace de couleur, pourrait-on jamais

produire l'opacité par la juxtaposition des deux corps? La question est presque puérile. Ainsi l'opacité, ou interception complète, tient essentiellement *à la coloration de l'un et de l'autre milieu dont se composé le couple présenté au rayonnement lumineux*. Or, cette interception complète, due à la réunion des deux milieux séparément perméables, nous l'obtenons à l'égard des radiations calorifiques moyennant des corps parfaitement incolores tels que l'eau et l'alun. Donc *ces corps, sans couleur apparente, sont colorés relativement à la chaleur rayonnante*. L'argument n'admet aucune réplique.

Nous voilà donc autorisés à considérer la thermochrôse, non seulement comme une propriété analogue à la coloration proprement dite, mais comme une *véritable coloration invisible* des corps par rapport aux rayons calorifiques.

Il est évident, d'autre part, que la conclusion s'applique aussi bien à l'agent qu'aux milieux traversés par lui. Que, par conséquent, nous devons accepter comme parfaitement juste la supposition qui nous a été suggérée par les premières expériences de transmission, savoir: que les divers flux de chaleur rayonnante et la presque totalité des milieux incolores sont affectés de *colorations calorifiques*, et que les premiers se composent de plusieurs sortes de *rayons colorés*, inégalement transmissibles par les diverses substances, à cause de la différence des *teintes de chaleur* propres à chaque milieu diathermique.

Ainsi, lorsqu'un rayonnement calorifique pénètre l'un de ces milieux, ce n'est pas une fraction de sa valeur totale qui s'éteint si rapidement en traversant les premières couches, comme on le croyait du temps de Delaroche, mais certains rayons donnés, dont la thermochrôse ne concorde pas avec celle du milieu.

Il est clair quo nous n' entendons point parler ici des milieux qui agissent uniformément sur toute sorte de rayons calorifiques, ainsi que le font, à l'égard de la lumière, les corps transparents rembrunis, les substances diaphanes louches ou impures, et même les milieux qui sont parfaitement limpides lorsqu'on les emploie sous une certaine épaisseur. Car cette action uniforme existe pour la chaleur rayonnante, aussi bien que pour la lumière ; la différence invariable de transmission, entre les lames 1 et 4 du tableau I, en offre une preuve indubitable et ajoute ainsi un nouveau trait de ressemblance entre la lumière et l'agent qui forme l'objet de nos études.

Je ferai encore une observation. Dans les comparaisons des thermochrôses propres aux rayonnements soumis à l'expérience, il faut bien distinguer l'*hétérogénéité relative* de l'*hétérogénéité absolue*.

La première est une différence de *couleur* entre deux ou plusieurs rayonnements; la seconde, une coexistence de diverses *couleurs* dans le même rayonnement.

Des considérations tout à fait analogues s'appliquent aux thermochrôses des milieux. Leurs hétérogénéités doivent être considérées sous deux aspects fort distincts, savoir : la différence de *couleur* de l'un à l'autre milieu, et la variété plus ou moins grande des *teintes élémentaires* qui concourent à la formation de la thermochrôse de chaque milieu.

La diversité de qualité, ou *de couleur thermique*, se rend manifeste, entre deux rayonnements, par la variation de transmission que la même lame éprouve sous leur influence successive, et entre deux milieux, par le changement survenu dans le rapport de leurs transmissions respectives, lorsqu'on passe de l'une à l'autre source de chaleur. L'hétéro-

généité des espèces qui composent un flux calorifique résulte des différences de rapport que les chaleurs émergentes de divers milieux donnent en traversant successivement la même lame; et la variété des *teintes élémentaires*, qui forment la thermochrôse d'un milieu, est mise en évidence par les différences de rapport que la même lame fournit relativement aux chaleurs émergentes du milieu exploré soumis à l'action successive de divers rayonnements.

On comprendra encore mieux ces principes généraux en discutant les données recueillies dans les tableaux précédents, et celles des expériences que nous allons décrire tout à l'heure.

L'inspection des résultats consignés dans les tableaux I, III, IV et V montre que *l'échelle de trancalescence* des milieux diathermiques subit des changemements tellement considérables en passant de l'une à l'autre radiation calorifique que, non seulement les valeurs des rapports de transmission sont altérés, mais renversés quelquefois; de manière qu'un corps moins transcalescent qu'un autre, pour le rayonnement d'une certaine source, le devient davantage sous l'action d'une source différente. Or, il résulte de toutes ces variations que les thermochrôses des milieux diffèrent entre elles aussi bien que les thermochrôses des radiations incidentes.

Et, d'abord, on conviendra sans peine que si deux sources calorifiques donnaient les mêmes éléments, dans les mêmes proportions, les quantités de chaleur transmises par la même lame, exposée successivement à ces deux radiations, devraient être égales entre elles. S'il y a une différence, elle proviendra donc de ce que les deux radiations contiennent des éléments divers, ou bien de ce

que les mêmes éléments ne s'y trouvent pas dans les mêmes proportions. Or, cette différence ne saurait évidemment se montrer sans l'emploi d'un milieu thermochroïque. Mais comment connaît-on la thermochrôse des milieux ? Par la proportion différente de chaleur qu'ils transmettent sous l'action des divers rayonnements. Ainsi, *lorsqu'un corps, successivement exposé aux radiations de deux sources, donne des transmissions différentes, il prouve en même temps, et sa propre nature thermochroïque, et la diversité de thermochrôse entre les rayonnements explorés.*

Supposons maintenant deux milieux qui donnent des transmissions différentes sous l'action d'un certain rayonnement calorifique. Il est clair que ce seul fait ne prouvera nullement leur différence de thermochrôse, car le phénomène pourrait bien être produit par un simple effet de diathermasie, comme on le voit à l'égard de la lumière sur deux verres de même couleur, dont l'un est plus foncé que l'autre. Mais alors le rapport de transmission se conserverait invariablement le même sous toute sorte de rayonnements ; et l'on vient de voir que cela n'a presque jamais lieu. D'où la conséquence *que les thermochrôses des milieux varient, aussi bien que celles des radiations incidentes.*

Les rayonnements ou les milieux doués de la même thermochrôse doivent donc éprouver, d'après ce que nous venons de dire, les mêmes vicissitudes, et fournir toujours des transmissions parfaitement égales. Hâtons-nous d'ajouter toutefois, que si un changement de transmission prouve une différence de qualité à l'égard des milieux ou des rayons qui les traversent, il faut bien se garder de croire que la proposition inverse a lieu nécessaire-

ment, et qu'une différence de qualité exige toujours une variation dans la quantité de chaleur transmise. Car il pourrait arriver qu'une radiation calorifique produisît la même transmission sur deux corps doués de thermochrôses différentes, ou qu'un corps fournît la même transmission sous l'action de deux rayonnements composés d'éléments divers calorifiques.

En effet, nos instruments thermoscopiques ne jouissent pas de cette précieuse faculté, que possèdent les organes de l'ouïe et de la vue, de distinguer, en même temps, et la présence et les modifications de l'agent qu'ils perçoivent. Nous jugeons simultanément de la force, du ton, du timbre et de la coexistence des sons qui viennent frapper nos oreilles; de la teinte, de la vivacité et de la pureté des couleurs qui s'étalent à nos yeux. Nos thermoscopes sont *sourds et aveugles* à toutes les qualités spécifiques de la chaleur rayonnante; ils donnent bien la somme de diverses radiations incidentes, mais ils confondent ensemble les rayons doués de toute espèce de thermochrôses; et, c'est à force de raisonnements et d'artifices, que nous devons remonter de ces effets complexes aux causes qui les produisent.

L'application de ces réflexions au cas qui nous occupe est de la plus grande simplicité. Supposons qu'un rayonnement donné contienne une ou plusieurs espèces a de rayons transmissibles par le milieu A, une ou plusieurs espèces b de rayons transmissibles par le milieu B, et une quantité x d'autres rayons arrêtés, absorbés, par l'un et l'autre milieu. Si a est égal à b, on comprend de suite que nos deux milieux transmettront la même quantité de chaleur, tout en possédant des thermochrôses différentes.

Imaginons maintenant un second rayonnement calorifique, qui, au lieu des rayons x susceptibles d'absorption, en contienne une proportion différente, y par exemple ; et qui renferme d'ailleurs la même quantité a des éléments transmissibles par A. Il est évident que, malgré cette différence de constitution des deux radiations, le milieu A, mis d'abord en présence du premier rayonnement, représenté par $a+x$, ensuite en présence du second rayonnement égal à $a+y$ donnera exactement la même transmission ; en sorte que nos deux flux de chaleur, doués de thermochrôses différentes, passeront toutefois eu quantités égales par un même milieu thermochroïque.

Retenons donc que *la transmission égale de deux milieux, exposés à la même radiation calorifique, n'est pas suffisante pour démontrer l'identité de leurs thermochrôses, et que l'identité thermochroïque de deux radiations ne résulte pas non plus nécessairement de l'égalité de leurs transmissions par le même milieu.*

C'est avec de semblables réserves que nous examinerons les résultats contenus dans le tableau ci-après. Les expériences qui ont servi à les établir sont tout à fait analogues à celles rapportées ci-dessus afin de prouver l'existence de la thermochrôse dans l'eau et dans l'alun. Après avoir mesuré les transmissions d'une série de lames de diverses substances par rapport aux rayons directs de la lampe Locatelli, on a répété l'opération relativement aux radiations de la même source de chaleur transmises par les cinq substances suivantes: sel gemme, alun, sélénite, bi-chrômate de potasse et verre noir opaque. Les quantités de chaleur qui servaient de point de comparaison étaient sensiblement constantes, et produisaient, par un rapprochement

convenable de la source à la lame, des dévations à peu près égales sur le galvanomètre en parvenant sur la pile thermoscopique, après avoir traversé l'une des cinq lames placées en tête du tableau. Chacune de ces déviations, ou plus exactement, chacune des intensités ou forces calorifiques correspondantes , est représentée par **100**. Il est presque superflu d'ajouter que les différentes actions galvanométriques développées par les six flux rayonnants tirés de la même source de chaleur , lorsque ces flux traversaient les diverses lames de la série , ont été pareillement réduites en intensités calorifiques, toutes les fois qu'elles surpassaient la limite où les forces cessent d'être proportionnelles aux positions angulaires de l'index magnétique.

Les radiations émergentes des cinq lames peuvent être en quelque sorte comparées aux diverses sources calorifiques mentionnées dans les tableaux précédents ; car si le rayonnement est ici invariable, les lames qui le transmettent absorbent des qualités et des quantités si différentes de ses rayons élémentaires, que les radiations transmises possèdent des compositions tout à fait distinctes, et comparables, jusqu'à un certain point , aux constitutions diverses des rayonnements vibrés par les corps plus ou moins échauffés.

TABLEAU V. (*)

NOMS des substances interposées	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES (en centièmes de la quantité incidente) POUR LA RADIATION					
	directe	émergente				
		du sel gemme	de l'alun	du bi-chromate de potasse	de la chaux sulfatée	du verre noir opaque (**)
Sel gemme	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
Chaux fluatée	78	78	90	88	91	91
Béril	54	53	80	66	91	57
Spath d'Islande	39	40	91	56	89	55
Verre (épais. 0,mm5)	54	54	90	68	85	80
Verre (épais. 8mm)	34	33	90	47	82	45
Cristal de roche	38	39	91	52	85	54
Bi-chromate de potasse.	34	33	57	71	53	24
Baryte sulfatée	24	25	36	25	47	57
Agathe blanche	23	23	70	30	78	17
Feldspath adulaire	23	22	23	43	58	23
Ambre jaune	21	20	65	20	61	8
Verre noir opaque (épais. 1,mm8)	16	16	0	14	18	52
Mica noir opaque (épais. 0,mm9)	20	20	0	16	12	43
Agathe jaune	19	19	57	24	64	14
Aigue marine	19	18	60	26	57	21
Borate de soude	18	18	23	23	33	24
Tourmaline verte	18	17	1	14	10	30
Gomme commune	18	18	61	12	52	4
Chaux sulfatée	14	14	59	22	54	15
Chaux sulfatée (épaiss. 12.mm)	10	10	56	17	45	0,5
Carbonate d'ammoniaque	12	12	44	11	34	5
Acide citrique	11	10	88	16	52	2
Tartrate de pot. et de soude.	11	11	85	15	60	1
Alun.	9	9	90	15	47	0

(*) *Les plaques qui ne portent pas d'indication spéciale ont pour épaisseur commune* 2,6 *millimètres.*

(**) *Épaisseur* 1,mm85.

Remarquons d'abord, que la constance de la transmission du sel gemme pour les chaleurs émergentes des diverses espèces de corps diathermiques, et l'inaptitude de cette même substance à changer les rapports de transmission que donne une série de lames exposées à la même radiation, sont de pures conséquences de l'athermochroïsme, c'est-à-dire de l'égale perméabilité pour toutes sortes de chaleurs rayonnantes, que dès nos premières expériences de transmission nous avons reconnu au sel gemme.

Passant ensuite aux radiations émergentes des autres corps, nous observerons en premier lieu que la loi déduite des expériences de Delaroche, relativement à la plus grande facilité de transmission des rayons sortant d'une lame, s'applique bien généralement au cas où la nouvelle lame à travers laquelle doit passer la radiation est de même nature que celle déjà traversée ; mais que parfois ce principe est en défaut, notamment lorsqu'il s'agit de lames formées avec des substances différentes. En effet, sans parler du sel gemme, qui laisse passer les flux de chaleur rayonnante dans la même proportion que s'ils provenaient directement de leur source, on trouve plusieurs substances qui, au lieu de transmettre plus facilement la radiation émergente de certaines lames, lui offrent au contraire un passage moins libre qu'à la radiation directe, et l'interceptent même quelquefois en totalité.

On conçoit aisément ces variations, en se rappelant les différences qui peuvent exister, et existent en effet, entre les thermochrôses des corps. La transmission est très-abondante pour les lames exposées aux rayons qui sortent de la même substance dont elles sont formées, parce que le rayonnement calorifique se trouve en grande partie dé-

barrassé des rayons absorbés par les premières couches du corps. Si les substances des deux lames sont différentes, la transmission est d'autant plus forte que le flux sortant de la lame antérieure contient une plus grande proportion d'espèces transmissibles par la lame postérieure. Elle est enfin complétement nulle lorsque les thermochrôses des deux lames sont pour ainsi dire opposées, de manière que tous les rayons émergents de la première restent anéantis dans leur passage à travers la seconde ; précisément comme la lumière, qui sort du verre vert imperméable au rayon rouge, est détruite par la force absorbante d'un verre rouge parfaitement pur. On dirait donc que la transmission de la seconde lame dépend uniquement de son affinité *thermochroïque* avec la première.

Cependant l'augmentation qui se manifeste dans la transmission d'un corps pour les rayons émergents d'un autre, placé devant lui, n'est pas toujours un indice certain de la ressemblance de leurs thermochrôses; car, cet accroissement peut se produire dans un milieu dont la thermochrôse soit fort différente de celle qui appartient au milieu qui le précède. Pour en être convaincus reprenons les notations que nous avons employées plus haut, afin de représenter les espèces de chaleur qui peuvent être transmises et absorbées par deux lames données A, B, et ajoutons-y de plus un quatrième terme pour dénoter les rayons transmissibles par l'une et l'autre lame ; supposition qui se vérifie souvent, puisque dans la chaleur, aussi bien que dans la lumière, les *colorations* des milieux ne sont jamais, ou presque jamais, parfaitement pures.

Soit donc $a + b + c + x$ le rayonnement de la lam-

pe, a représentant les rayons transmissibles par A, et *absorbables* par B; b les rayons absorbables par A et transmissibles par B; c les rayons transmissibles et x les rayons absorbables, par l'un et l'autre corps.

On comprendra d'abord comment la radiation naturelle de la source devient plus transmissible par B en passant par A, lorsque c étant supérieur à a, la transmission de B, savoir $b + c$, ne surpasse pas les 50/100 de la quantité totale de chaleur transmise.

En effet, puisque les rayons b et x sont complétement absorbés dans la traversée de la première lame, la radiation émergente de A ne contiendra plus que a et c; et ces deux espèces de rayons constitueront les 100 parties incidentes sur B. Or a est intercepté par B, et c se transmet; donc il y aura plus de la moitié, c'est-à-dire plus des 50/100 de chaleur transmise, si c est plus grand que a, comme nous l'avons supposé.

Si la transmission directe de B était de beaucoup inférieure aux 50/100, on conçoit que la radiation émergente de A pourrait devenir plus transmissible par B avec une valeur de c moindre que a; et si la transmission directe de B surpassait la moitié de l'incidence, un excès considérable de c sur a pourrait encore suffire au même but, de rendre la transmission de A par B plus grande que celle de la radiation directe.

Enfin si tous les rayons transmissibles par A pouvaient se transmettre par B sans que pour cela les rayons b fussent transmissibles par A; en d'autres termes, si a était égal à zéro, on aurait une transmission presque totale par B des rayons sortant de A, quoique les colorations de ces deux corps, représentées dans ce cas

particulier par a et $b+c$, fussent encore différentes ; car alors A, interceptant toujours b et x, ne laisserait plus passer que c, et cette espèce de chaleur serait entièrement transmise par B moins la quantité réfléchie aux deux surfaces de la lame.

Ainsi, parce que les rayons émergents de l'alun sont transmis par le verre, et par le cristal de roche autant que par une lame d'alun, il ne faut pas en conclure que ces deux corps possèdent la thermochrôse de cette dernière substance.

Il y a d'ailleurs un moyen bien simple pour trancher les questions de cette nature ; et c'est la méthode même qui sert de base à tout ce que nous venons de dire sur la thermochrôse des milieux, et des rayons qui les traversent. Si le corps qui transmet en abondance la radiation émergente de l'alun était effectivement doué de la même thermochrôse que lui, le rapport entre sa transmission et celle d'une plaque d'alun devrait se conserver constant sous les radiations de toute sorte de sources calorifiques ou sous les radiations émergentes de toute sorte de substances exposées au rayonnement direct ou indirect d'une source quelconque. Pour ne pas sortir de nos exemples et des données contenues dans notre tableau, voyons donc si les transmissions du cristal de roche et de l'alun, qui pour le flux émergent de ce dernier corps sont sensiblement égales, se conservent encore telles pour les flux émergents des autres lames. Déjà dans la troisième colonne cette égalité se change en 85:47 ; elle devient 52:15 pour la quatrième colonne, 156:1 pour la cinquième, et donne un rapport incommensurable pour la sixième. On ne peut donc douter que *la thermochrôse du cristal de roche ne soit*

très-différente de celle de l'alun. Quant au verre, sa transmission, qui était égale à celle du cristal de roche et de l'alun pour la radiation émergente de cette dernière substance, commence déjà à différer quelque peu de la transmission de la première substance pour la troisième colonne; la différence augmente dans la quatrième colonne, elle devient beaucoup plus grande à la cinquième et diminue quelque peu à la sixième. *La thermochrôse du verre ne coïncide donc point avec celle du cristal de roche.* On en peut dire autant des différents corps contenus dans le tableau, puisque tous varient leurs rapports de transmission en passant de l'un à l'autre flux calorifique transmis par les lames de différente nature.

Ainsi les thermochrôses de ces corps, et notamment *les thermochrôses des milieux limpides et incolores sont différentes, et ces différences sont parfaitement semblables à celles que nous donneraient les milieux incolores si, au lieu d'apprécier directement chaque couleur, nous ne pouvions évaluer que les quantités de lumière transmise.*

Il est presqu'inutile d'ajouter que les expériences, d'où nous venons de déduire la variété des thermochrôses propres aux différentes substances, prouvent aussi la variété des éléments qui existent dans la radiation de la flamme, puisque les actions calorifiques, directes ou transmises, sur lesquelles notre discussion repose, proviennent toutes du rayonnement de la lampe de Locatelli.

Mais *la thermochrôse ne change pas seulement en passant de l'un à l'autre milieu, elle varie aussi dans le même milieu sous des épaisseurs différentes, pourvu que l'une d'elles soit très-petite.* Pour mettre cette vérité

dans tout son jour il faut opérer sur diverses épaisseurs du même corps, comme nous l'avons fait à l'égard des radiations émergentes des corps différents ; c'est-à-dire qu'il faut approcher plus ou moins la source jusqu'à ce que la radiation émergente donne toujours la même déviation de 30 à 35 degrés au rhéomètre, en venant frapper directement sur la pile; puis interposer une plaque donnée d'une autre substance, observer la nouvelle déviation et la rapporter à la déviation initiale que l'on exprimera toujours par 100. Cette proportion de chaleur transmise sera généralement moindre pour la lame mince que pour la lame épaisse, quoique les quantités de chaleur incidente sur la plaque interposée soient parfaitement égales. Ainsi les 100 rayons émergents de deux lames du même verre dont les épaisseurs étaient 0,5 et 10 millim., se réduisirent à 17,5 pour la lame mince, et à 28 pour la lame épaisse, lorsqu'on les fit passer à travers une plaque de chaux sulfatée de 4,5 millimètres d'épaisseur. Ces mêmes rayonnements d'égale intensité transmis par les deux lames de verre, donnèrent 10 et 19,5 en traversant une plaque d'alun de 4,5 millimètres d'épaisseur. Dans ces expériences il est tout à fait inutile d'avoir recours à la table des correspondances des degrés aux forces rhéométriques, puisqu'il s'agit de mettre en évidence une simple différence entre les quantités de chaleur transmise par un corps sous l'action de deux rayonnements de même énergie, et qu'à cet effet l'inégale déviation de l'index thermoscopique suffit, d'autant plus que les différences s'élèvent souvent à plusieurs degrés.

Le fait du changement de thermochrôse de la même substance lorsqu'on passe d'une lame mince à une lame

épaisse rentre parfaitement dans notre comparaison avec les milieux colorés, car nous avons déjà remarqué que ces milieux commencent d'abord par recevoir dans leur sein tous les éléments de la lumière blanche, et en éteignent ensuite une quantité plus ou moins grande en laissant passer librement le reste. Or, lorsqu'on approche beaucoup de la surface d'entrée, on rencontre encore existantes plusieurs des radiations élémentaires qui sont absorbées plus tard, et celles-ci, en se mêlant à ces espèces particulières de rayons colorés qui traversent librement le corps, modifient nécessairement la teinte de la lumière émergente.

Concluons, que le seul changement dans les propriétés de transmission des flux de chaleur, qui sortent d'une plaque mince et d'une plaque épaisse de la même substance, exposées à la radiation de la lampe, suffirait au besoin pour montrer la diversité des éléments calorifiques dont se compose le rayonnement de la flamme, si cette hétérogénéité de composition n'avait été surabondamment démontrée par la discussion des résultats consignés dans le tableau V.

§. 4.

Considérations théoriques sur les faits qui précèdent.

Dès nos premières observations sur la transmission calorifique des corps solides et liquides, nous avons remarqué la différence qui existe entre la transcalescence et la transparence. Nous avons vu des substances incolores livrer passage à des quantités très-différentes de chaleur à

l'état rayonnant, des corps bruns ou colorés en transmettre plus que certaines substances diaphanes parfaitement limpides; nous avons vu enfin des substances complétement opaques qui sont perméables au rayonnement calorifique. Nous avons remarqué aussi, dès nos premières expériences de transmission, la grande analogie entre l'action calorifique des lames incolores et l'action lumineuse des lames colorées. Une comparaison scrupuleuse des plus petites circonstances relatives à ces deux ordres de phénomènes nous a ensuite convaincus, que les milieux parfaitement limpides, sans la moindre trace apparente de coloration, sont doués d'une véritable thermochrôse, qui absorbe certains rayons de chaleur, et en laisse passer d'autres, comme le font les substances diaphanes colorées exposées à la lumière. Nous venons enfin d'observer que cette thermochrôse varie de l'un à l'autre milieu incolore, et même d'une tranche mince à une tranche épaisse d'un seul de ces milieux limpides, ainsi que cela arrive dans les milieux colorés par rapport aux rayons lumineux. Maintenant il faut passer de l'analyse à la synthèse des résultats obtenus, et voir si ces phénomènes, si singuliers, de transmission lumineuse et calorifique fournissent des caractères tendant à prouver que la chaleur est un agent distinct de la lumière.

Cette question, remarquons-le bien, *est tout à fait indépendante de la nature des agents qui constituent la lumière et la chaleur; elle ne s'appuie, en conséquence, sur aucune hypothèse particulière ;* au contraire, elle ressort d'un principe généralement admis, qui forme, en dernier lieu, le but définitif auquel tendent incessamment les sciences physiques; car il ne suffit pas d'étudier avec le plus grand soin toutes les circonstances relatives à une nouvelle série

de phénomènes et d'en mesurer les divers éléments avec exactitude; on doit aussi tâcher de saisir toutes les analogies qui rattachent ces phénomènes nouveaux aux forces connues de la nature; et, en remontant de conséquence en conséquence vers leurs origines ou leurs lois fondamentales, les réduire, *par une suite d'argumentations rigoureuses*, au plus petit nombre possible de principes généraux.

Les faits, énumérés dans la récapitulation précédente, montrent que les diverses sortes de radiations calorifiques possèdent des propriétés spécifiques et générales analogues à celles de rayons lumineux. Cependant, les mêmes corps se comportent quelquefois d'une manière complétement opposée sur l'un et l'autre agent. Cette opposition suffit-elle pour nous donner le droit d'admettre que la chaleur rayonnante est un agent distinct de la lumière ?

On le dirait au premier abord, et j'ai été moi-même de cet avis pendant quelque temps; mais, après une étude plus approfondie des radiations calorifiques, je me suis intimement convaincu que LES DEUX TRASPARENCES et LES DEUX COLORATIONS *des corps, loin d'établir un caractère distinctif entre la chaleur et la lumière, constituent, au contraire, le lien le plus puissant qui réunisse ensemble ces deux grands agents de la nature.*

Lorsqu'on eût acquis la certitude que le calorique séparé de la lumière rayonne, qu'il se propage en ligne droite, instantanément et immédiatement dans l'atmosphère, et se réfléchit sur les surfaces polies des métaux en formant l'angle de la réflexion égal à celui de l'incidence, on commença par attribuer à la radiation calorifique obscure la même constitution que l'on admettait pour la radiation lumineuse, qui, elle aussi, possède une action échauffante.

Plus tard, les lois du refroidissement, les divers pouvoirs émissifs des surfaces élevées à la même température, la différente distribution de la chaleur et de la lumière dans le spectre solaire, détournèrent l'attention générale de la question de l'identité des deux agents. Les expériences d'Herschel sur la transmission calorifique et lumineuse des rayons du soleil et des sources terrestres et les observations de Delaroche, au lieu de ramener les esprits à la véritable constitution du rayonnement calorifique, les déroutèrent tout à fait. Dès lors, on négligea complétement les considérations suggérées par la ressemblance des lois qui président à la propagation des rayons lumineux et des rayons calorifiques; les analogies de composition de ces deux agents furent mises hors de question, et les géomètres se crurent autorisés à admettre comme bases de leurs recherches analytiques, que la chaleur rayonnante possédait un caractère d'uniformité et d'homogénéité qui la rendait, de ce côté, parfaitement semblable à la chaleur ordinaire. Aussi est-ce seulement sous le rapport de la quantité que les rayonnements calorifiques se trouvent définis et soumis au calcul dans la théorie de *l'équilibre mobile* de P. Prévost, dans les *théories de la chaleur* de Fourier et de Poisson, et dans tous les mémoires et traités mathématiques du même genre publiés avant la découverte de la thermochrôse.

Cette espèce d'oubli dans lequel tombèrent les idées relatives à l'unité du principe qui constitue la lumière et la chaleur à l'état rayonnant, trouvait en quelque sorte son excuse dans l'ignorance des théorèmes, qui nous ont été si nettement démontrés par nos expériences, savoir: *l'hétérogénéité des éléments qui composent les flux de cha-*

leur rayonnante ; le passage immédiat de toute sorte de radiations calorifiques à travers différents corps solides et liquides, et leur égalité de transmission par l'un de ces corps. En effet, comment rapprocher la lumière, agent composé, d'un agent que l'on croyait homogène ? Comment admettre l'identité de deux principes, l'un desquels avait tous ses éléments transmissibles par une classe entière de substances solides et liquides, et l'autre ne pouvait guère traverser librement aucun de ces milieux lorsqu'il provenait d'une source à basse température ? Mais si l'analogie du calorique avec la lumière a été mise en évidence par la transmission de toute espèce de chaleur au travers du sel gemme, du spath fluor, et du soufre, le théorème de l'hétérogénéité des rayons calorifiques ne se déduit-il pas d'un ordre de faits contraires à la théorie de l'identité ?

Car, si les rayons obscurs n'etaient que de la *lumière invisible*, et la chaleur des rayons lumineux une propriété de la lumière elle-même, ne semble-t-il pas, au premier abord, que tous les éléments dont l'un des agents se compose devraient être complétement absorbés, ou complétement transmis, par la même classe de corps qui absorbent ou transmettent tous les éléments de l'autre ? Et cependant nous voyons la coloration de la chaleur apparaître dans presque tous les milieux incolores, et la trasparence calorifique, dans plusieurs substances tout à fait opaques.

Avant de discuter la valeur de cet argument, il faut tâcher de débarrasser notre esprit d'un préjugé qui s'y trouve fortement enraciné.

La *visibilité* étant d'une haute importance pour nos

relations avec le monde extérieur, nous nous figurons qu'elle constitue un caractère tranché entre l'un et l'autre groupe de radiations. Cependant, pour peu que l'on considère attentivement cette opinion, on ne trouve rien qui la justifie; son inexactitude au contraire, est nettement démontrée par l'observation et par le raisonnement.

En faisant indiquer sur une surface donnée les limites du spectre solaire par un grand nombre de personnes, j'ai trouvé plusieurs individus qui leur assignent des positions plus éloignées du centre que les autres; en sorte que pour eux, il y a lumière là où l'obscurité régne aux yeux de la majorité des observateurs. Ce phénomène ne dérive point d'un degré particulier de *force visuelle*, car il se montre indistinctement sur toute sorte de vues; il tient donc à la constitution propre de l'œil chez tel ou tel individu. M. Pianciani, qui a établi des comparaisons analogues, est parvenu aux mêmes conclusions (*). Et les savants connaissent depuis longtemps les expériences de M. Seebeck sur la vision de certaines personnes incapables d'apercevoir le rouge extrême de la série des couleurs prismatiques.

Un autre phénomène, étroitement lié avec ce double rôle *de visibilité* et *d'invisibilité* des rayons placés vers les extrémités du spectre solaire, et bien constaté par les observations et les expériences d'un grand nombre de médecins, de physiologues, et de physiciens, c'est l'effet différent de la sensation ordinaire que les couleurs produisent sur certaines personnes.

(*) *Pianciani, Elementi di Fisico-chimica. Vol. 1. pag.* 111 (Napoli 1842. sec. ediz.)

On trouve des familles entières, dont tous les membres évaluent parfaitement bien les divers degrés d'intensité de la lumière, mais sans y reconnaître aucune apparence de coloration ; de manière que les perceptions lumineuses de ces individus se résument dans la sensation du blanc et du noir. Il existe plusieurs personnes, et de ce nombre était l'illustre Dalton, aux yeux desquelles le rouge est complétement identique avec le vert, et qui, sans la différence de forme, ne sauraient distinguer sur l'arbre les cerises mûres du feuillage environnant. D'autres confondent l'orangé avec le jaune, le bleu avec le rouge, et une infinité de teintes dérivées du mélange de ces différentes couleurs.

Cette appréciation anomale des couleurs ne provient pas d'une coloration particulière des humeurs de l'œil, qui *détruirait* par absorption telle ou telle espèce de lumière avant son arrivée sur la rétine, comme la mort encore récente de Dalton a permis de le constater (*); mais elle dérive, bien certainement, d'une action différente de l'ordinaire, que certains rayons exercent sur les papilles nerveuses destinées à la perception de la lumière.

Elle ne provient pas davantage d'un état maladif de l'organe de la vue, car les personnes qui en sont affectées possèdent un œil bien constitué, parfaitement sain, et capable d'accomplir ses fonctions les plus délicates.

Il paraît même que leur force ou sensibilité visuelle est

(*) *Ce fut d'après les dispositions testamentaires de ce grand chimiste, mort le 27 Juillet 1844, que le D.r Ransom pratiqua les dissections et l'analyse.* (*Voyez les* Scientific Memoirs *du D.r Taylor Vol. XIII p.* 182.)

quelquefois supérieure à la portée de la vision ordinaire, puisque parmi les personnes douées de cette espèce de vue anomale on en trouve quelques unes qui peuvent lire dans la plus grande obscurité (*). Leur nombre n'est pas non plus aussi restreint qu'on serait d'abord tenté de le croire. Pierre Prévost assure qu'il y en a une sur vingt; et M. Elie Wartmann, qui a publié deux mémoires très-intéressants sur le même sujet, ne croit pas cette proportion exagérée (**). Au reste peu importe le nombre, pourvu que ces cas exceptionnels existent, et sur ce point il ne peut rester l'ombre d'un doute (18).

(*) *Two letters of D. Daubeney Tuberville of Salisbury to M. William Musgrave of Oxond. Phil. Trans. n. 164. p. 736.*

(**) *Prem. et Sec. Mémoires sur le Daltonisme. Genève*, 1844 *et* 1849.

(18) Il ne sera peut-être pas inutile de rappeler ici que les lumières de diverses couleurs ont des propriétés spécifiques de transmission tout à fait semblables à celles des différentes espèces de chaleur rayonnante, et que, lorsque par suite d'une vue anomale le caractère de la coloration manque, on peut toujours au moyen de ces propriétés distinguer entre elles les diverses espèces de lumière.

En effet, supposons un de ces individus qui confondent le vert avec le rouge; en observant les couleurs du spectre solaire cet individu n'apercevra dans les zones rouge et verte que des rayons plus ou moins intenses d'une teinte uniforme. Mais veut-on le convaincre que les éléments lumineux dont la bande rouge se compose sont différents des éléments lumineux qui constituent la bande verte; on lui fera regarder le spectre à travers une lame de verre rouge pur: les premiers passeront, les autres seront absorbés; d'où la conséquence irréfragable que les qualités de ces deux lumières sont différentes.

Ce moyen d'analyse est, comme on voit, tout à fait semblable à celui que nous venons d'employer, ci-dessus, pour démontrer la thermochrôse différente des divers éléments calorifiques qui composent le

Or, comme une lumière donnée ne saurait avoir en même temps deux couleurs différentes, comme les radiations placées aux extrémités du spectre solaire ne sauraient être en même temps visibles et invisibles, il faut bien en conclure que la visibilité, l'invisibilité, et les couleurs proprement dites, se rapportent uniquement à l'organisme animal, et *n'ont aucune importance par rapport à l'agent qui fournit la série entière des rayons vibrés par le soleil et les sources calorifiques terrestres.*

Ces conséquences, dont la légitimité est supérieure à toute objection, reçoivent une confirmation indirecte, mais palpable pour ainsi dire, au moyen d'un autre genre d'action, exercée sur nous à distance par l'intermède d'un fluide pesant.

La grande analogie, qui existe entre la sensation de la vue et celle de l'ouïe, est bien connue de tous ceux qui possèdent la plus légère teinte des sciences physiques et psychologiques. On sait en outre que la seconde de ces deux sensations dérive de la perception d'une certaine série d'ondes excitées dans l'air par les vibrations des corps sonores. Un corps qui vibre trop lentement produit des ondes aériennes plus longues, mais d'une constitution absolument semblable à celle des ondes sonores; et cependant elles passent inaperçues à l'organe de l'ouïe. Les ondes très-courtes dues aux vibrations très-rapides des corps sont, elles aussi, insensibles pour nos oreilles, tout en étant constituées comme les ondes qui produisent les sons.

flux rayonnant de la flamme. Son application a donc sur la coloration proprement dite le grand avantage de servir pour toutes sortes de vues et pour toutes sortes de rayons vibrés par les sources lumineuses ou calorifiques.

Malgré la ressemblance parfaite de tous les mouvements ondulatoires que l'air éprouve par le contact des corps vibrants, le sens de l'ouïe ne peut donc se mettre en rapport qu'avec un certain nombre d'entre eux.

Il y a plus: les belles observations du docteur Jonng ont démontré que les sons très-aigus ou très-graves ne produisent aucune impression sur certaines personnes, qui sont d'ailleurs extrêmement sensibles aux notes intermédiaires. Et nous savons qu'il n'est pas donné à tout le monde d'apprécier la justesse des tons, ni de goûter les charmes de l'harmonie.

On le voit, les deux sensations suivent une marche parallèle et présentent exactement les mêmes phénomènes à l'état normal et anormal. La cause des sons a cependant sur la cause des couleurs le grand avantage d'être parfaitement connue et indépendante de toute hypothèse. Et puisque nous savons, à ne pas en douter, que l'action normale de l'ouïe dérive de la perception d'un certain nombre d'ondes aériennes, nous pouvons en conclure avec certitude que les actions anormales de cet organe consistent dans la faculté de percevoir une série plus ou moins étendue que la série ordinaire des ondes sonores, ou dans l'incapacité de distinguer entre elles certaines ondes de cette dernière série.

Ainsi, de même que la propriété d'être *sonores* ou *muettes* n'indique aucune différence intrinsèque entre les ondes de diverses longueurs excitées dans l'air par les vibrations des corps élastiques, de même le rayonnement des corps est *lumineux* ou *obscur* sans que la propriété d'agir ou de ne pas agir sur l'organe de la vue constitue un caractère essentiel, inhérent à la nature des rayons;

et propre à les partager en deux classes spéciales et distinctes (19).

Cela posé, ne perdons pas de vue que la transmission des corps opaques a mis hors de doute l'existence de la chaleur obscure dans le rayonnement des sources lumineuses ; alors la singularité des causes qui produisent les différences observées entre *les deux transmissions* des corps cessera, et nous ne verrons plus dans les phénomènes de la diathermasie et de la thermochrôse que des conséquences toutes naturelles du principe adopté.

En effet, imaginons trois milieux parfaitement incolores : l'un perméable à toute sorte de rayons, l'autre perméable aux rayons lumineux et à une partie des rayons obscurs, le dernier, enfin, perméable aux seuls rayons lumineux.

Il est facile de se convaincre que ces trois milieux, si limpides et privés de toute couleur apparente, auront, relativement à la somme des radiations lumineuses et des radiations obscures, des *propriétés de coloration* très-di-

(19) Cette comparaison (dont le second membre forme, ne l'oublions pas, une proposition à part *démontrée directement* par les observations de visibilité, d'invisibilité et de différence de coloration que prennent les mêmes rayons aux yeux de différentes personnes) acquiert le dernier degré d'évidence, lorsqu'on admet que la lumière consiste dans un mouvement vibratoire propagé au moyen d'un fluide éthéré interposé entre l'oeil et la source rayonnante. Et tout en obéissant à la condition que je me suis imposée d'établir la vérité de la thermochrôse, sans avoir recours à aucune hypothèse sur l'essence du rayonnement, on ne trouvera pas étrange, j'espère, si j'avoue franchement dans cette note, que le parallélisme des sensations normales et anormales de la vue et de l'ouïe me paraît constituer l'une des données les plus favorables au système des ondulations.

stinctes ; car le premier sera un *corps véritablement incolore* pour la série entière des rayons ; le second constituera une *substance colorée* par rapport au groupe des rayons obscurs ; et le troisième sera un *milieu opaque* à l'égard de ces derniers rayons, malgré sa transparence parfaite pour les radiations lumineuses.

D'après cette manière de voir, les différences de diathermasie des substances incolores proviendraient donc de leurs différences de thermochrôse, relativement à cette seule portion de la série des rayons qui comprend les éléments invisibles de chaleur. Le sel gemme, agissant également sur toutes les espèces de rayons lumineux ou obscurs, transmettrait des flux de chaleur qui retiendraient toutes les propriétés thermochroïques du rayonnement direct de la source. Les milieux intermédiaires entre le sel gemme et les substances donnant le *minimum* de transmission, comme la sélénite, le verre ou le cristal de roche, admettraient certaines espèces de rayons obscurs, en absorberaient d'autres, et fourniraient des radiations émergentes douées d'une thermochrôse moins prononcée que celle de l'incidence. Enfin l'eau et l'alun, qui constituent les milieux incolores de moindre diathermasie, intercepteraient toutes les radiations obscures, et le rayonnement émergent de ces milieux serait complètement privé de toute affection thermochroïque.

Avant de vérifier si les données numériques insérées dans nos tableaux confirment ces conséquences de la théorie, tâchons d'éclaircir une difficulté qui pourrait nous être opposée.

Personne n'élèvera aucune objection sur la multiplicité des *espèces visibles* de chaleur, puisque de telles espè-

ces constituent, selon le principe adopté, les couleurs prismatiques elles-mêmes. Mais ne pourrait-on pas croire, au premier abord, que la supposition de plusieurs sortes de rayons calorifiques invisibles est superflue, et que l'on peut expliquer les phénomènes moyennant une seule qualité de chaleur obscure ?

Le lecteur, qui aura bien saisi la portée des expériences décrites dans les pages précédentes, répondra, sans hésiter, que si les différences observées entre la transparence et la transcalescence des corps provenaient d'une seule espèce de radiations calorifiques obscures, le rapport de transmission de deux milieux incolores, relativement aux rayons émergents de toute sorte de lames soumises au rayonnement de la même source, serait constant ; or, nous savons, par le dernier tableau (V), que ce rapport varie. Les phénomènes thermochroïques que présentent les substances diaphanes incolores proviennent donc de plusieurs espèces de chaleurs rayonnantes obscures. On a d'ailleurs une seconde preuve de la multiplicité des espèces calorifiques invisibles dans la différence de thermochrôse qui existe entre une lame mince et une lame épaisse de la même substance incolore. La coexistence de plusieurs sortes de chaleurs obscures est donc un élément que la théorie de l'identité doit prendre nécessairement en considération pour remonter à la cause des différences, que manifestent les milieux incolores relativement aux rayons lumineux et calorifiques.

Au reste, on verra bientôt comment on parvient à extraire de la radiation d'une même source lumineuse plusieurs flux de chaleur obscure, doués de propriétés fort distinctes, et à dissiper ainsi par des expériences direc-

tes jusqu'à la dernière ombre du doute sur la vérité de la proposition énoncée.

Mais nous pouvons montrer dès à présent que nos principes reposent sur une base incontestable: car, le fait de la chaleur émergente du sel gemme, avec les mêmes propriétés thermochroïques que la radiation directe, résulte évidemment des nombres insérés dans les deux premières colonnes du tableau.

L'opacité de l'alun pour les rayonnements obscurs des corps chauffés au-dessous de l'incandescence est prouvée par les deux dernières colonnes du tableau I. Et le manque de thermochrôse, produit en conséquence de l'absorption des radiations obscures contenues dans le rayonnement des sources lumineuses, ressort nettement des nombres qui forment la troisième colonne du tableau V. Ces nombres montrent en effet que le flux calorifique émergent de l'alun est doué de toutes les propriétés de la lumière. Intercepté comme elle par les corps opaques quelconques, on le voit se transmettre, à l'instar des rayons lumineux, en proportions sensiblement égales par deux couches du même milieu limpide, fort différentes en épaisseur, ou par deux lames incolores de même épaisseur et de compositions différentes, sauf toutefois quelques cas particuliers, qui s'expliquent très-bien par la structure feuilletée de la plaque, multipliant les réflexions, ou par la qualité spéciale du corps, qui empêche de porter ses parties superficielles à un haut degré de poli. Nous ajouterons qu'en répétant sur l'eau les expériences dont les résultats sont consignés dans la troisième colonne du tableau V et en observant que ce liquide intercepte totalement les radiations obscures des deux dernières sour-

ces du tableau I, on arrive à des conséquences tout à fait pareilles ; en sorte que les rayons calorifiques émergents de l'eau et de l'alun manquent réellement de thermochrôse et suivent les mêmes lois de transmission que les radiations lumineuses.

On ne pourra douter, enfin, que la chaleur transmise par la sélénite ne possède des propriétés intermédiaires entre les flux calorifiques qui sortent du sel gemme et de l'alun ou de l'eau, si l'on veut bien remarquer : 1° que les rayons émergents de cette substance passent en partie par les corps opaques et donnent des transmissions différentes à travers les milieux limpides et incolores, comme on peut s'en assurer en jetant un coup d'œil sur la cinquième colonne du tableau V ; 2° que ces différences sont inférieures à celles qui caractérisent les rayonnements directs ou transmis par le sel gemme, car elles ne sortent pas du rapport de un à deux ; tandis que sous l'action des rayons directs ou émergents du sel gemme, les transmissions proportionnelles de ces mêmes substances oscillent entre un et dix.

L'expérience s'accorde donc parfaitement avec la théorie, et tout nous prouve que ce sont les seuls rayons obscurs, mêlés à la radiation lumineuse de la flamme et des corps incandescents en général, qui, par leur passage ou leur absorption plus ou moins grande dans l'intérieur des milieux, produisent la transcalescence des corps opaques et les différences si marquées que l'on observe entre les transmissions calorifique et lumineuse des corps diaphanes incolores.

En admettant ce principe, on comprend parfaitement pourquoi la thermochrôse de la dernière classe de corps

ne donne aucun signe apparent de son existence; car une *coloration* relative à des rayons obscurs doit être nécessairement *invisible*, l'œil ne pouvant distinguer si ces rayons sont presque tous transmis, comme cela arrive dans le cas du sel gemme, ou presque tous interceptés, comme cela a lieu pour l'alun.

Quant à la transmission des milieux opaques, elle est parfaitement semblable, je dirai presque identique, à la transmission de certains verres rouges, qui laissent passer les rayons de cette couleur et interceptent complétement tous les autres.

La seule différence consiste dans ce que les milieux *noirs opaques* au lieu de la radiation rouge transmettent un certain groupe de rayons invisibles, et ne peuvent en conséquence donner lieu dans aucun cas à une transmission apparente.

Toutes les substances opaques perméables à la chaleur rayonnante appartiennent d'ailleurs à des genres de corps naturels ou artificiels, dont le type fondamental est parfaitement limpide et incolore.

Et, à propos d'un tel lien, rattachant pour ainsi dire la *transparence calorifique de l'opacité* à la transparence ordinaire, nous ferons en passant une remarque analogue relativement à la classe entière des milieux diathermiques.

Moins le petit nombre de cas auxquels nous venons de faire allusion, tous ces milieux sont plus ou moins diaphanes. Or, pourquoi la condition de la transparence serait-elle si intimement liée à celle de la transcalescence, si l'agent qui produit le rayonnement calorifique é-

tait distinct de l'agent auquel nous devons le rayonnement lumineux ?

Il est presque superflu de faire observer que puisque la lumière constitue, d'après notre théorie, une simple propriété extrinsèque d'un certain groupe de rayons de chaleur, les espèces particulières qui en jouissent sont toujours calorifiques. On se tromperait de beaucoup toutefois, si l'on croyait à une certaine proportionnalité entre ces deux effets ; car on verra, dans le paragraphe suivant, que plusieurs rayons des plus lumineux sont surpassés en température par les rayons les plus sombres du spectre solaire.

C'est précisément à ce manque de proportionnalité (qui dérive de la nature intime des rapports existant entre l'organe de la vue et les diverses espèces de chaleurs lumineuses), et à l'absorption de toute sorte de rayons de chaleur obscure, que l'on doit attribuer la faiblesse de l'action calorifique propre à cette qualité particulière de lumière transmise par les combinaisons de verre vert, et d'eau ou d'alun, dont il a été déjà question plus haut (Chap. IV. §. 3.).

Il n'y a pas longtemps que l'on croyait dénuée de chaleur la lumière provenant de la combustion lente du phosphore et de certaines matières végétales et animales en voie de décomposition, parce qu'elle ne produit aucune action appréciable sur les thermoscopes à air les plus délicats. On aurait dû cependant réfléchir que, puisque nous n'apercevons cette faible lueur qu'avec le secours de l'obscurité, il fallait d'abord exalter énormément la puissance sensitive de nos moyens thermoscopiques avant de pouvoir décider, en connaissance de cause, si la lumière phosphori-

que possède ou non la propriété échauffante ; car il est indubitable que l'œil plongé dans les ténèbres devient beaucoup plus sensible que dans son état ordinaire. Cette réflexion nous induisit, Nobili et moi, à reprendre un tel sujet aussitôt que le thermomultiplicateur eut acquis le haut degré de perfection qu'il possède aujourd'hui, et nous trouvâmes en effet que la radiation des corps phosphorescents donnait sur notre instrument des signes de chaleur très-sensibles(*).

La nature nous présente un autre exemple de lumière douée d'une action calorifique excessivement faible dans les rayons lunaires. Mais ceux-ci tiennent leur manque apparent de chaleur de la diffusion éprouvée par le rayonnement solaire à la surface de la lune, qui le renvoie sur la terre deux à trois cent mille fois plus affaibli que le rayonnement direct du soleil.

L'extrême sensibilité du thermomultiplicateur, aidée du puissant auxiliaire d'une grande lentille de verre, a cependant permis, dans ces derniers temps, de mettre hors de doute la chaleur de la radiation lunaire (20).

(*) *Annales de Chimie et de Physique de Paris, année* 1832.

(20) L'expérience fut faite à Naples dans l'une des pièces de mon appartement. Voici la lettre dans laquelle j'annonçai le résultat de mes recherches à l'Académie des Sciences de l'Institut de France.

« Une lentille à échelons d'un mètre de diamètre, destinée à l'Observatoire du Mont Vésuve venait de m'arriver. Pour étudier sans danger l'ajustement des divers anneaux, ainsi que la distance et l'étendue du foyer, j'exposai cette magnifique pièce d'optique à un beau clair de lune, et l'amenai dans un plan exactement perpendiculaire à la direction des rayons. La lumière se concentra à un mètre environ de distance, sur un espace circulaire d'un centimètre de diamètre. Ce petit cercle très brillant et assez nettement terminé avait une étendue sensiblement égale à la section des tu-

Nous pouvons donc conclure que la science ne reconnait aujourd'hui aucun rayon ayant la propriété d'éclairer les corps, sans posséder en même temps la propriété de les échauffer.

bes qui garnissent mes piles thermoscopiques, ce qui me suggéra l'idée d'essayer son action sur ces piles. Une déviation considérable se développa sur le rhéomètre multiplicateur aussitôt que les rayons, pénétrant dans l'intérieur du tube, vinrent frapper la face antérieure de l'appareil. Étonné de la vivacité de cette action et me doutant bien qu'elle ne dérivait pas de la chaleur lunaire, je plaçai la main à une certaine distance au devant de l'ouverture : l'index du rhéomètre retourna aussitôt à zéro, le dépassa, et prit une direction contraire; preuve évidente que son mouvement primitif dérivait d'un *rayonnement frigorifique*, c'est-à-dire d'un abaissement de température dans la face de la pile exposée au foyer. L'origine de ce froid était facile à assigner.

« Comme la lentille se trouvait sur un balcon découvert et sous un ciel parfaitement pur, elle devait, à cause du grand pouvoir émissif du verre, rayonner sa chaleur en abondance vers l'espace, et abaisser ainsi sa température au-dessous de celle de la pile, qui était enveloppée dans son étui métallique et placée dans l'intérieur de l'appartement.

« Tant que la pile était abritée par le couvercle en métal, le faible rayonnement de celui-ci ne lui permettait pas de ressentir l'influence de la lentille; mais aussitôt que ce couvercle était abaissé, l'échange calorifique avait lieu entre les deux corps, et la pile, perdant plus qu'elle ne recevait, devait nécessairement abaisser la température de la face découverte et produire ainsi le courant électrique qui causait la déviation de l'aiguille du rhéomètre. Pour remédier à cet inconvénient, je transportai la lentille en dedans de la croisée qui donnait sur le balcon, et je fis appliquer à la croisée une natte qu'on pouvait aisément relever ou abaisser selon qu'il s'agissait d'établir ou d'intercepter la communication entre la lentille et le rayonnement de la lune. Je tins la natte baissée jusqu'à ce que l'équilibre de température fût établi; et, après m'être assuré qu'on n'obtenait aucune déviation au rhéomètre

Le nom de *chaleurs lumineuses* donné aux radiations de la lumière, se trouve ainsi complétement justifié.

Rappelons d'ailleurs que, si les rayonnements des corps chauffés au-dessous de l'incandescence sont entièrement for-

lorsqu'on abattait le convercle de la pile, placée toujours au foyer de la lentille, je fis arriver sur l'instrument la lumière de la lune: il se manifesta une déviation de quelques degrés du côté de la chaleur. Je répétai aussitôt l'expérience, et à ma grande surprise la déviation eut lieu en sens contraire.

« Quelques instants de réflexion suffirent pour me persuader que ces changements de direction tenaient, selon toute probabilité, à des bouffées d'air extérieur qui entraient de temps en temps dans la chambre et se faisaient jour jusqu'à la face découverte du thermoscope. On aurait pu disposer les choses de manière à intercepter l'accès de l'air dans la place occupée par l'appareil thermoscopique; mais guidé par la théorie de l'identité entre la chaleur et la lumière, et par l'expérience bien connue de Saussure, relativement au thermomètre placé au fond d'une caisse vitrée, je crus qu'on parviendrait mieux au but, en introduisant dans l'intérieur du tube deux diaphragmes de verre parfaitement diaphanes, et bien polis sur leurs quatre faces; le premier à une petite distance de la pile, le second tout près de l'ouverture. Je montai donc ainsi les tubes de ma pile, et, à la première occasion favorable, je refis l'expérience. L'index de l'appareil resta d'abord stationnaire pendant quelques instants, puis il commença à dévier lentement, et après quatre à cinq minutes, il s'arrêta d'une manière stable à 3,° 7. Je retirai alors la pile du foyer, et je la plaçai à côté, son ouverture toujours tournée vers le centre de la lentille: la déviation commença aussitôt à diminuer, et en quelques minutes l'index revint au zéro. Je répétai plusieurs fois la même opération, en retirant la pile tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, et toujours l'aiguille dévia, étant au foyer et retomba au zéro hors de cette position. Il va sans dire que le sens de la déviation correspondait à celui de l'action calorifique.

« L'expérience était donc parfaitement nette et ne pouvait soulever aucune objection. En effet, j'eus l'occasion de la répéter plus

més de chaleur obscure, ceux des sources lumineuses en contiennent toujours une grande quantité. Rappelons que

tard en présence de M. Belli professeur de physique à l'Université de Pavie, de M.M. Mossotti et Lavagna de l'Université de Pise, et de plusieurs autres savants distingués, qui tous sortirent de mon cabinet intimement convaincus que la lumière de la lune est calorifique.

« Lorsque je réfléchis que les physiciens, qui tentèrent de découvrir la chaleur lunaire dans le courant du siècle dernier, employèrent, d'après Lalande, des lentilles d'un mètre à un mètre et un tiers de diamètre et le thermoscope extrêmement sensible d'Amontons, je soupçonne fortement que les résultats négatifs annoncés par ces physiciens, tenaient, en grande partie, au froid engendré dans leurs lentilles par le rayonnement céleste, réuni au refroidissement causé par les agitations de l'air extérieur, auquel leurs instruments étaient exposés; de sorte que je ne désespère pas du tout de rendre le phénomène sensible avec les thermoscopes ordinaires de dilatation.

« En attendant, par l'emploi de mes moyens actuels d'observation, j'ai pu m'assurer que l'action varie, comme on devait bien le prévoir, non seulement avec l'âge, mais aussi avec la hauteur de cet astre au-dessus de l'horizon; une petite déviation du plan de la lentille hors de la direction normale aux rayons diminue considérablement l'effet; en sorte que sous l'empire de ces circonstances diverses, j'ai eu des indications qui ont varié depuis 0°, 6, jusqu'à 4,° 8. Mais la différence de température entre les deux faces de la pile thermoscopique, montée avec les diaphragmes de verre, se produit d'une manière si lentement graduée, que les aiguilles galvanométriques dévient avec une régularité admirable, et arrivent constamment à leur état d'équilibre, ou retournent vers le zéro, sans subir la moindre oscillation.

« Effectuée sous différentes lunaisons, l'expérience a toujours réussi; c'est-à-dire que l'action s'est bien trouvée, tantôt plus, tantôt moins sensible, selon les conditions plus ou moins favorables, mais *l'appareil thermoscopique frappé par le rayonnement lunaire a toujours marqué une augmentation de température.*

les mêmes radiations lumineuses prennent des couleurs différentes aux yeux de diverses personnes, que des rayons situés près des limites du spectre solaire sont visibles pour certains individus, et invisibles pour d'autres, que les expériences de transmission des milieux incolores et des milieux opaques décèlent de véritables *couleurs* dans les rayons de chaleur obscure, que toutes sortes de radiations visibles ou invisibles passent en proportions égales à travers une même substance solide; et nous verrons qu'il n'y a pas plus de raison de supposer une différence essentielle entre un rayon de chaleur obscure et un rayon de lumière, qu'entre deux rayons lumineux de couleur différente.

Toutes les espèces de rayons qui constituent un flux calorifique, obscur ou lumineux, proviendront donc pour nous d'un seul agent; les espèces obscures posséderont la même constitution et les mêmes caractères spécifiques que les espèces lumineuses, et celles-ci ne seront autre chose que des rayons visibles de chaleur.

Ces vues théoriques paraissent les seules admissibles dans l'état actuel de la science. Si l'on voulait en embrasser d'autres il faudrait, selon les préceptes de la philosophie naturelle, démontrer d'abord l'impossibilité de rallier à une cause unique tous les faits qui constituent les sciences de l'optique et de la chaleur rayonnante. Mais on vient de voir les propriétés calorifiques les plus irréconciliables, en apparence, avec les propriétés analogues de la lumière, se changer par un examen plus approfondi en autant d'arguments favorables à la théorie de l'identité. D'autre part, en supposant aux radiations calorifiques une origine différente des radiations lumineuses, on ne pourrait rendre raison de l'analogie des circonstances et des

lois générales qui président à la naissance et à la propagation de l'une et de l'autre sorte de rayons, ni expliquer la cause de la température propre à chaque couleur, et encore moins celle de la ressemblance parfaite des modifications, que les diverses espèces de radiations calorifiques, obscures ou lumineuses, subissent sous l'action des substances capables de les transmettre, de les réfléchir ou de les absorber.

Enfin, il ne faut pas oublier que l'unité du genre auquel nous rapportons toutes ces espèces de chaleur, visibles ou invisibles, est déduite d'une série de propositions complétement indépendantes des hypothèses relatives à l'essence même du phénomène qui constitue le rayonnement.

Or, si l'on veut bien prendre la peine de considérer attentivement toutes ces choses, on finira par se convaincre que *la théorie*, qui va nous servir de guide dans le cours de nos recherches ultérieures, n'a aucun des caractères propres *aux systèmes* et n'est, en réalité, que la plus simple expression des faits.

§. 5.

Action des couleurs.

Selon le principe que nous venons d'adopter, les différences observées entre la transparence et la transcalescence des corps proviendraient donc d'une *nouvelle série de couleurs* répandues dans la plus grande partie des substances diaphanes, mais opérant uniquement sur les rayons de chaleur obscure et ne pouvant par cela mê-

me exercer aucune action sur l'organe de la vue, ni altérer la limpidité apparente des milieux incolores. S'ensuit-il de là que les *anciennes couleurs*, c'est-à-dire, les couleurs opérant sur la lumière et altérant visiblement la limpidité des milieux, ne soient pas susceptibles d'agir sur les radiations calorifiques invisibles? Pas le moins du monde. Je dirai plus: tout physicien qui se sera emparé des bases fondamentales sur lesquelles notre théorie repose, et voudra bien réfléchir, pendant quelques instants, aux phénomènes si bizarres d'absorption que présente le spectre solaire, regardé au travers des verres colorés, n'hésitera pas à se prononcer pour l'opinion contraire, et admettra par conséquent comme fort probable que les couleurs proprement dites agissent en même temps, et sur les rayons lumineux, et sur les rayons obscurs.

Mais laissons de côté toute prévention théorique, et tâchons de résoudre le problème par la seule voie de l'expérience.

Pour décider, de la manière la plus simple et la plus directe, si les couleurs opèrent réellement sur les radiations obscures, il n'y aurait qu'à introduire successivement les diverses matières colorantes dans un milieu incolore et athermochroïque d'une épaisseur invariable, et à comparer les transmissions du milieu soumis aux radiations calorifiques dénuées de lumière, avant et après l'opération. Mais on ne connaît aujourd'hui, parmi les corps solides et liquides, qu'un seul milieu librement perméable à toute sorte de rayonnements; et malheureusement sa constitution physique ne se prête guère à de semblables modifications. On est donc forcé d'avoir re-

cours aux milieux thermochroïques incolores, et de compliquer ainsi la question des matières colorantes par l'intervention de la thermochrôse propre au milieu employé. Cependant, si l'on compare les transmissions de la même substance dans les deux états de limpidité et de coloration, l'action de la thermochrôse reste, pour ainsi dire, neutralisée.

Mais d'un autre côté, *puisque les milieux thermochroïques incolores ne livrent passage qu'à une seule portion des espèces invisibles, on ne peut, à l'aide de ces milieux, résoudre la question par rapport aux rayons interceptés de chaleur obscure.* Il faut donc se contenter d'une solution partielle du problème. Nous allons voir, toutefois, que les résultats ainsi limités sont encore assez intéressants, et concordent parfaitement bien avec l'idée que nous nous sommes formée sur l'unité du genre auquel appartiennent les diverses espèces de rayons visibles et invisibles de chaleur, coexistantes dans le rayonnement des corps incandescents.

La transparence ordinaire ou lumineuse d'un milieu incolore peut être diminuée de deux manières différentes, savoir : par l'action d'une *teinte brune* absorbant indistinctement toute sorte de lumière, comme le fait cet état de transparence imparfaite, cette espèce particulière de trouble, que l'on est convenu d'appeller *translucidité;* ou par l'action des couleurs, qui attaquent de préférence certains rayons et laissent passer librement les autres.

Cette distinction ne saurait avoir, pour nous, aucun sens absolu, car les teintes que l'on appelle brunes parce qu'elles absorbent également toute la série des espèces visibles de chaleurs, pourraient fort bien n'apporter au-

cun empêchement au passage d'une portion plus ou moins grande des espèces obscures qui accompagnent toujours les radiations des sources lumineuses ; elles pourraient agir sur le reste avec une énergie beaucoup plus grande que sur les éléments lumineux ; et, dans l'un et l'autre cas, elles devraient être nécessairement classées parmi les couleurs proprement dites. Cependant, pour laisser la question intacte et suivre la marche purement expérimentale que nous nous sommes prescrite, nous allons adopter la division usitée, et examiner successivement les actions qu'exercent sur la transmission calorifique, 1.° *les matières brunes*, 2.° *les matières ayant une couleur décidée*. Commençons par les premières.

Parmi les divers corps mentionnés dans les tableaux I et IV, on trouve le cristal de roche limpide et enfumé. Aucune substance n'est peut-être plus propre au but que nous avons actuellement en vue; car la teinte brune du cristal de roche altère si peu sa constitution physique, qu'il arrive quelquefois de voir le même cristal limpide jusqu'à une certaine profondeur, et rembruni dans le reste. Or la transmission du cristal enfumé se trouve un peu inférieure à celle du cristal limpide dans le tableau I, elle est au contraire un peu supérieure dans le tableau IV. Nous en conclurons d'abord que le rembrunissement a bien peu d'influence sur la chaleur transmise, car dans l'un et l'autre cas la transmission du cristal enfumé se conserve toujours à peu près égale à celle du cristal incolore ; et, si la matière brune agissait aussi fortement sur la transmission calorifique que sur la transmission lumineuse, il y aurait infailliblement une grande diminution dans les deux cas. Ces différences appartiennent

donc aux petites variations de densité, de pureté ou d'homogénéité qui se rencontrent dans les cristaux de diverses provenances, variations qui doivent influer sur la diathermasie aussi bien que sur la diaphanéité.

Ainsi, les expériences dont les résultats numériques sont contenus dans les tableaux I et IV ne sauraient indiquer quelle action la matière brune, qui colore le cristal de roche, exerce sur la chaleur rayonnante; car l'infériorité du cristal enfumé dans le premier tableau pourrait dériver d'une moins grande pureté, et non d'une *action amortissante* de la matière brune ; et la supériorité du cristal enfumé dans le second tableau pourrait provenir d'une plus grande pureté et non d'une *action excitante* de cette même matière.

S'il y avait un moyen de rendre les expériences comparatives, c'était d'opérer sur une de ces pièces de quartz en partie brune et en partie incolore, dont il a été question tantôt. Je possède un très-beau cristal de ce genre ayant 86 millimètres d'épaisseur, coupé et poli à ses deux extrémités, perpendiculairement à l'axe de cristallisation. La bande claire repose sur l'une des faces latérales et suit le cristal dans toute sa longueur, en conservant toujours la même largeur de six millimètres environ. Après elle commence la teinte brune, qui est d'abord extrêmement foncée, et perd graduellement de son intensité en allant vers le côté opposé; comme si la matière colorante, repoussée de la zone décolorée, s'était portée d'abord sur les particules les plus proches du cristal, en laissant les plus éloignées à leur état naturel. La différence de diaphanéité entre la bande claire et la bande la plus foncée du cristal est telle, qu'au moyen d'une simple veil-

leuse on lit aisément de nuit à travers la première, tandis qu'à travers la seconde on distingue à peine les lettres de jour et sous l'action directe du rayonnement solaire.

Or, les transmissions calorifiques de ces deux bandes, prises au moyen d'nn thermomultiplicateur linéaire, approchent tellement de l'égalité qu'il fallut un très-grand nombre d'observations pour distinguer leur différence. Les moyennes de trente mesures comparatives donnèrent pour ces transmissions : bande claire 59,24, bande obscure 58,17. Si l'on cherche à évaluer le rapport de diaphanéité de ces deux bandes du cristal, par les méthodes connues de Bouguer ou de Rumford, on ne peut arriver à aucune évaluation, attendu l'impossibilité de produire une image sensible sur le papier avec la lumière, excessivement pâle, émergente de la zone foncée. Ainsi, dans le cristal de roche la matière brune, qui opère si puissamment sur la lumière, paraît n'avoir qu'une action très-faible sur la chaleur concomitante.

Mais voici un cas dans lequel le rembrunissement du milieu produit un effet tout différent.

Deux des récipients, employés dans l'étude de la transmission des liquides, furent remplis d'eau distillée. On laissa l'un d'eux dans son état naturel, et l'on versa successivement dans l'autre des gouttelettes d'encre, pour communiquer à l'eau un degré de rembrunissement à peu près égal à celui du cristal de roche enfumé, dans sa partie la plus sombre. Alors on mesura les transmissions calorifiques de ces deux couches liquides, et l'on eut : 7°,75 pour l'eau limpide, 0°,49 pour l'eau rembrunie. Ici la matière brune opère donc avec une grande puissance, et sur la lumière, et sur la chaleur.

Pour se rendre compte de la différence si marquée qui existe entre ces deux actions, il faut avoir bien présent à la mémoire ce que nous disions tantôt sur les deux groupes de rayons transmissibles par les milieux diathermiques.

Le cristal de roche limpide transmet, non seulement tous les rayons visibles de chaleur, mais un très-grand nombre des espèces calorifiques invisibles contenues dans le rayonnement de la flamme. Or, la matière brune, qui colore une partie de l'échantillon employé, diminue bien l'intensité des espèces lumineuses, mais n'attaque point les espèces transmises de chaleur obscure; et comme celles-ci sont en quantité beaucoup plus grande que les espèces lumineuses, la diminution apportée dans la perméabilité calorifique du cristal incolore par la présence de la matière brune est à peine appréciable. L'eau au contraire absorbe tous (ou presque tous) les rayons de chaleur lumineuse. Il s'ensuit, qu'en y introduisant la matière brune, la puissance calorifique diminue en même temps que la puissance lumineuse; car, d'après la théorie que nous avons adoptée, la lumière est une propriété appartenant à un certain groupe de rayons calorifiques, propriété qui varie proportionnellement à l'intensité de la chaleur de chaque rayon, quoiqu'elle ne soit nullement en rapport avec la force échauffante de ses divers éléments, comme nous le verrons tout à l'heure.

La transmission calorifique de l'eau étant très-faible, il convient de substituer, dans ces expériences, un bec d'Argant à la lampe Locatelli pour rendre les effets bien marqués. Il est clair que dans cette substitution la qualité du flux calorifique change; mais les résultats com-

paratifs sont sensiblement les mêmes ; c'est-à-dire, que l'influence do la matière brune est encore excessivement faible dans le cristal de roche, et très-apparente dans l'eau.

Le bec d'Argant a d'ailleurs l'avantage de pouvoir servir à une autre expérience assez curieuse.

Supposons que par un rapprochement plus ou moins grand de cette source calorifique, on produise successivement, par l'action de la chaleur transmise à travers le cristal de roche incolore, et à travers l'eau pareillement incolore, la même déviation de 15 à 20 degrés au rhéomètre. Si l'on ôte la cheminée de verre et que l'on rende ainsi la combustion moins vive, on verra la déviation thermoscopique *diminuer* de trois à quatre degrés dans le cas de l'eau, et *augmenter* de cinq à six degrés dans le cas du cristal de roche. Comment expliquer cette opposition de deux effets produits par l'action d'une même cause?

Nous venons de rappeler que le cristal de roche transmet divers rayons de chaleur obscure : nous ajouterons; maintenant que plusieurs de ces rayons, engendrés pendant la combustion de l'huile, sont interceptés par le verre. Or, en ôtant la cheminée de la lampe, toutes ces radiations calorifiques invisibles sont mises en liberté, arrivent sur le cristal de roche, le traversent, et, compensant avec excès la perte qui dérive de l'affaiblissement de la flamme, produisent l'augmentation thermoscopique observée. Mais les choses se passent bien autrement à l'égard de l'eau, qui intercepte toute sorte de radiation calorifique invisible ; car alors, au moment où l'on ôte la cheminée, les rayons de chaleur obscure, échappés à l'absorption du verre, viennent s'éteindre dans l'intérieur

du liquide, le thermoscope ne reçoit plus aucune compensation à l'affaiblissement d'intensité survenu dans la combustion, et son indication diminue avec la vivacité de la flamme.

En résumant les faits relatifs à l'influence que les matières brunes exercent sur la transmission calorifique, on voit : 1° que l'encre introduite dans l'eau pure diminue notablement la quantité de chaleur transmise, 2° que la teinte brune du cristal de roche enfumé ne produit, dans la transmission de ce second milieu incolore, qu'un affaiblissement à peine sensible.

Or, en supposant même, ce qui est d'ailleurs extrêmement probable, que l'encre eût agi proportionnellement à l'intensité des rayons transmis par l'eau, nous ne pouvons décider si la même proportionnalité d'action s'étend aux diverses espèces de chaleur obscure interceptées par ce même milieu, ni dire en conséquence si l'encre est, par rapport à la série entière des rayons calorifiques, une teinte brune ou colorée. Mais nous ne sommes plus dans le même cas à l'égard de la matière brune du cristal de roche enfumé, car cette matière, qui attaque si énergiquement les rayons lumineux, laisse passer sans y causer aucune soustraction sensible, le groupe très-intense des rayons obscurs transmissibles par le cristal de roche limpide. Elle a donc tous les caractères d'une couleur décidée et justifie ainsi ce qui a été dit ci-dessus par rapport au sens relatif, et non absolu, que l'on doit attacher à la classification des matières colorantes en deux sections distinctes.

Cette vérité sera bientôt éclaircie par d'autres faits ; mais voyons d'abord quelle est l'influence que les cou-

leurs proprement dites exercent sur le phénomène de la transmission calorifique.

Un verre blanc et plusieurs verres de couleur de même épaisseur, présentant les principales teintes du spectre, étant exposés à la radiation libre de la lampe, et aux flux de chaleur émergents du sel gemme, de l'alun, de la sélénite et du verre noir opaque, donnèrent les transmissions suivantes.

TABLEAU VI.

VERRES COLORÉS épaisseur commune 1,8 mill.	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES (en centièmes de la quantité incidente) POUR LA RADIATION				
	directe	émergente			
		du sel gemme	de l'alun épaiss. 2,6 mil	de la sélénite épaiss. 2,6 mil	du verre noir opaque épaiss. 1,8 mil
Verre blanc (incolore)	40	40	90	83	55
. . . violet (très-foncé)	34	34	76	72	47
. . . rouge (très-foncé)	33	33	74	69	45
. . . orangé (clair)	29	29	65	58	39
. . . vert pomme (clair)	25	25	3	20	50
. . . vert minéral (clair)	23	23	1	15	55
. . . jaune (très-clair)	22	22	49	46	30
. . . bleu (foncé)	21	21	47	42	29
. . . noir (opaque)	16	16	0	18	52
. . . indigo (très-foncé)	12	12	27	26	17

Pour faciliter la discussion des résultats, prenons d'abord le cas le plus simple, qui est celui du rayonnement sortant de l'alun. Nous savons, en effet, que l'alun absorbe tous ou presque tous les rayons de chaleur obscure, et transmet les seuls éléments de la chaleur lumineuse ; voilà pourquoi dans les expériences précédemment exécutées sur l'alun, les lames parfaitement incolores, exposées à la radiation émergente de ce milieu, donnèrent la même transmission calorifique, et les lames complétement opaques une interception totale. Cependant, si l'on compare les quantités de chaleur transmises par nos verres colorés avec les degrés de rembrunissement que leur communiquent les teintes plus ou moins foncées de ces verres, ou, si l'on aime mieux, avec leurs degrés de transparence, on ne verra pas d'abord sans quelque surprise que ces corps, dont la diaphanéité occupe une place intermédiaire entre l'opacité et la transparence complète des milieux incolores, ne suivent pas du tout la loi qui semblait découler si naturellement de nos expériences sur la qualité du flux calorifique émergent de l'alun, et que les lames les plus diaphanes ne se laissent pas toujours traverser par la plus forte proportion de chaleur ; ou bien, que les verres les plus sombres ne sont pas toujours ceux qui donnent la moindre transmission calorifique. Les différences s'élèvent dans certains cas à une proportion énorme: on voit, en effet, la cinquième et la sixième lame, qui portent la désignation *clair*, transmettre de 25 à 76 fois *moins de chaleur* que la seconde et la troisième, qui sont accompagnées de l'indication *très-foncé*. Que devient donc notre théorie relative à la disparition des phénomènes de la thermochrôse dans le cas où le flux calo-

rifique des corps incandescents est privé de ses radiations obscures?

Notre théorie reste intacte en présence de ces nouveaux faits; elle en est même si peu ébranlée qu'elle va nous expliquer la cause de cette contradiction apparente, et nous montrer que les différences entre la diaphanéité et la transcalescence des verres colorés, sous l'action de la seule chaleur lumineuse, sont des conséquences directes du principe qui lui sert de base. Pour s'en convaincre, il faut avoir recours aux expériences bien connues sur la distribution de la chaleur dans le spectre solaire, où les couleurs se suivent, comme chacun sait, dans l'ordre suivant : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Rappelons d'abord que, pour déterminer les véritables températures des rayons colorés qui composent le spectre, il est indispensable d'opérer à sept ou huit mètres de distance (comme le faisait Newton dans ses belles expériences sur la lumière) lorsqu'on se sert de thermomètres ordinaires; ou bien qu'il faut employer des corps thermoscopiques n'ayant qu'un millimètre de largeur, et un prisme ou une tranche prismatique, cinq à six fois plus large seulement, lorsqu'on mesure les températures des rayons à la distance d'un mètre. Ces conditions sont absolument nécessaires, si l'on veut avoir les éléments de la lumière solaire suffisamment purs et séparés, et obtenir ainsi leurs véritables rapports de température ; autrement les chaleurs propres d'une partie des éléments lumineux se trouvent altérées par le mélange des rayons calorifiques obscurs, que W. Herschel observa le premier au-dessous de la limite rouge (*).

(*) *Bibliothèque Universelle* de Genève, janvier 1844.

Ces principes posés, voici comment la chaleur est distribuée entre les couleurs prismatiques.

La température, à peine appréciable à l'extrémité violette, augmente graduellement, mais lentement, sur l'indigo et le bleu, où elle est encore très-faible. Passé le bleu, la chaleur devient un peu plus vive que dans les couleurs précédentes; sur le jaune, l'orangé et le rouge, elle augmente considérablement, et atteint sa plus haute valeur à l'extrémité de cette dernière couleur. La différence de température entre les radiations violettes, indigo, bleues, vertes d'un côté, et les radiations jaunes, orangées, rouges de l'autre, est tellement grande, que le premier groupe de rayons peut être considéré comme froid par rapport au second. Au-delà du rouge, jusqu'à une certaine distance de cette limite, la température devient encore plus élevée, en vertu des radiations obscures auxquelles on faisait tantôt allusion. Mais *ici il s'agit de la seule partie visible du spectre*, et parmi les diverses couleurs qui la composent, le rouge extrême est incontestablement doué de la plus haute température, quel que soit le milieu incolore dont est formé le prisme, au moyen duquel on décompose le rayon solaire.

On croyait encore dernièrement, d'après les expériences de quelques physiciens, que les spectres formés avec certaines substances avaient le *maximum* de température dans l'orangé ou le jaune; mais cette opinion ne saurait plus se soutenir aujourd'hui que l'on est parvenu à démontrer, par de nouvelles recherches, que ce transport du *maximum* dans l'intérieur des couleurs s'observe seulement sur les *spectres impurs*, formés par un mélan-

ge des éléments visibles et invisibles de la radiation solaire (*).

Si l'on remarque, maintenant, que le jaune est la couleur la plus lumineuse du spectre, que non seulement le violet, l'indigo, le bleu et le vert, doués d'une chaleur plus faible, mais aussi l'orangé, lui sont inférieurs en clarté, et que cependant cette dernière couleur *commence à surpasser la température du jaune, surtout en approchant du rouge, où elle est justement moins claire ;* que le rouge, déjà plus sombre que l'orangé et le jaune à sa partie supérieure, devient tellement foncé vers la limite du spectre qu'il échappe complétement à la vue de l'observateur, lorsqu'on ne le regarde pas à travers un verre bleu de cobalt, qui absorbe une grande partie des autres couleurs et imprime une teinte sombre aux corps environnants; et que toutefois *les rayons rouges placés à l'extrémité du spectre, malgré cette faiblesse excessive d'intensité lumineuse, sont ceux qui possèdent la température la plus élevée;* si l'on considère attentivement tout cela, on ne tardera pas à se convaincre, que la différence entre la diaphanéité et la diathermasie des verres colorés pour le rayonnement qui sort de l'alun, au lieu de former une objection contre l'uniformité d'action exercée par ces verres sur la chaleur et la lumière du flux rayonnant, débarrassé de ses éléments obscurs, constitue au contraire une nouvelle preuve de l'identité des deux agents.

En effet, admettons que les *lames foncées* se laissent traverser par une forte proportion d'éléments chauds et peu lu-

(*) *Voyez le cahier du journal cité*, page 267.

mineux, et que les *lames claires* soient imperméables à ces éléments, et perméables aux seuls rayons lumineux doués d'une faible température, et nous concevrons de suite comment les premières lames surpasseront les secondes dans la quantité de chaleur transmise, tout en leur étant inférieures du côté de la transmission lumineuse. Maintenant ceci n'est pas une hypothèse, mais un fait parfaitement démontré par l'expérience.

Excepté une seule espèce, tous les verres de couleur transmettent en même temps plusieurs sortes de lumière. Or, si l'on regarde le spectre solaire à travers nos lames colorées, on voit les lames, dont la transmission lumineuse est faible et la transmission calorifique intense, livrer passage aux couleurs *les plus chaudes*; tandis que ces couleurs à températures élevées sont interceptées par les verres doués d'une faible transmission calorifique et d'une grande diaphanéité. Ainsi, la lame violette du numéro 2, que je conserve encore dans ma collection, absorbe la partie centrale du spectre, qui est la plus lumineuse, mais elle transmet tout le rouge avec l'indigo et le bleu. Les numéros 5 et 6, au contraire, interceptent complétement le rouge, l'orangé, et presque tout le jaune, et ils tranmettent le vert et le bleu avec quelques traces de jaune. Enfin les lames, qui donnent des trausmissions calorifiques intermédiaires, exercent aussi des actions intermédiaires entre les actions des éléments lumineux les plus chauds du spectre, et celles des éléments qui sont froids comparativement à leur force lumineuse.

Tout se passe donc comme l'exigent les rapports calorifiques des diverses teintes transmises par nos verres colorés.

Si l'on demandait pourquoi ces rapports ne sont pas proportionnels à l'élément lumineux, nous répondrions que cette question sort de notre but.

En effet, nous avions d'abord annoncé que les différences entre la transmission calorifique et la transmission lumineuse étaient produites par les rayons invisibles de chaleur, qui abondent jusque dans le rayonnement des sources les plus lumineuses.

De là, la conséquence que ces phénomènes devaient disparaître en expérimentant sur des rayons de lumière sensiblement privés de chaleur obscure; et c'est aussi ce que nous avons vu s'effectuer à l'égard des milieux incolores limpides ou noirs opaques, exposés à la radiation émergente de l'alun.

Cependant les milieux colorés, soumis à cette même radiation, étaient venus ébranler notre confiance dans les preuves acquises, en transmettant des quantités de chaleur qui ne présentaient aucun rapport avec leurs degrés de transparence, et nous nous étions demandé si ce manque de proportionnalité n'était pas contraire à nos idées sur l'origine de la thermochrôse et sur l'identité des radiations lumineuses et calorifiques.

Rappelant alors les expériences relatives à la distribution de la chaleur dans le spectre solaire, il a été facile de nous convaincre que les couleurs ne possédaient pas des températures proportionnelles à leur intensité lumineuse; que, par conséquent, il n'était point extraordinaire de voir que les transcalescences de nos verres colorés, relativement aux rayons lumineux séparés des rayons obscurs, ne concordaient point avec leurs degrés de transparence.

Pour résoudre la question proposée, il ne s'agissait donc

pas d'étudier la cause de ce défaut de proportionnalité, qui tient aux rapports existant entre la physiologie de l'œil et les propriétés particulières des diverses espèces de rayons capables d'exciter la sensation de la lumière, mais de vérifier si, indépendamment de l'intensité lumineuse des rayons transmis, les lames qui donnaient la plus grande quantité de chaleur étaient réellement celles qui se laissaient traverser par les couleurs *les plus chaudes*; et c'est précisément ce que nous venons de constater.

Toutes les conditions du problème se trouvent donc satisfaites.

La difficulté plus ou moins grande de concevoir, indépendamment de toute hypothèse sur la nature intime de la radiation, la cause du manque de proportionnalité entre l'énergie calorifique des rayons visibles et l'intensité de la sensation lumineuse que ces rayons exercent sur l'organe de la vue, ne saurait rendre notre thèse incomplète (21).

(21) Dans un mémoire lu à l'Académie des Sciences de Naples, le 2 février 1842, et imprimé dans plusieurs recueils scientifiques, j'ai dit comment on pourrait expliquer la différence qui existe entre les intensités calorifique et lumineuse des rayons visibles, en admettant la théorie des ondulations et le principe du mouvement vibratoire que les fibrilles élémentaires de la rétine, *sollicitées par une force analogue à la* RÉSONNANCE, prendraient sous l'action des rayons qui leur parviennent à travers les humeurs et enveloppes de l'œil. Cette force *ne leur permettrait pas de vibrer avec une énergie proportionnelle à l'intensité des diverses ondulations qui composent le groupe des radiations visibles, mais elles oscilleraient avec une intensité plus ou moins grande, suivant l'analogie qui existe entre la nature du mouvement vibratoire dont elles sont susceptibles, et la période ondulatoire du rayon lumineux.*

C'est ainsi que la résonnance fait vibrer les cordes ou les mem-

Portons maintenant nos regards sur la cinquième colonne du tableau IV. Qu'y voyons-nous? Un flux calorifique, émergent d'un corps opaque transmis en quan-

brnnes tendues avec une énergie plus ou moins prononcée, selon les rapports harmoniques existant entre leur état de tension et la longueur des ondes sonores incidentes.

La *tension des fibrilles ou molécules nerveuses* de la rétine favoriserait les mouvements *de consonnance* avec les vibrations éthérées, depuis le violet jusqu'au jaune, et contrarierait ensuite de plus en plus les oscillations que tendrait à lui imprimer le reste du spectre; de telle manière que la moindre action se trouverait à l'extrémité rouge, qui est pourtant la plus intense de toutes les radiations de chaleur visible.

Quant aux rayons obscurs *chimiques* et *calorifiques* placés au-delà du violet et en deçà du rouge, les expériences de MM. Brücke et Knoblauch semblent avoir prouvé que leur invisibilité dérive réellement, comme le croyaient W. Herschel et Ampère, de l'absorption totale que ces rayons subissent par l'action des membranes et des humeurs de l'œil; en sorte qu'il n'y aurait dans ce cas aucune impression sur l'organe de la vue, parce que les radiations seraient interceptées avant de parvenir sur la rétine. D'ailleurs, l'ineptitude à la vision du petit nombre de rayons obscurs, qui échapperaient aux forces absorbantes des milieux traversés, pourrait être expliquée par un désaccord complet entre leurs périodes d'oscillation, et les mouvements vibratoires dont les fibrilles élémentaires de la rétine sont susceptibles.

Ne serait-ce pas à la différence d'aptitude vibratoire de ces fibrilles nerveuses sous l'action des diverses espèces de chaleur perceptibles pour nous, qu'il faudrait attribuer l'impossibilité de comparer entre elles les intensités relatives de deux couleurs différentes?

Je terminerai cette note par quelques mots de réplique à la censure d'une expression dont je me suis servi, dans le mémoire que je viens de citer, pour expliquer comment la lumière s'engendre d'après le système des ondulations.

Le savant rédacteur du *Répertoire d'optique moderne* dit (page

tité plus grande par la lame de verre incolore que par les lames colorées.

Les matières colorantes agissent donc sur le flux de

549), que *c'est sans doute par mégarde* que j'ai attribué l'origine de la lumière aux oscillations des atomes pesants, puisque la cause du rayonnement lumineux dérive du mouvement de l'éther interposé entre les atomes des corps, et ne réside point dans les oscillations des molécules pondérables elles-mêmes, ce qui lui paraît *vraiment incroyable.*

Il est possible, que l'éther interposé dans les interstices moléculaires *devienne lumineux* par un mécanisme analogue à celui qui *rend sonore* l'air contenu dans les instruments à vent. Mais comment l'équilibre de ce fluide peut-il être troublé, et son mouvement vibratoire initié, sans le concours des molécules du corps? Voilà toute la question. Or il me semble évident qu'elle ne saurait recevoir, sous cette forme, aucune solution satisfaisante, et qu'il faut, de toute nécessité, avoir recours à la matière pondérable pour se rendre compte de la cause qui met l'éther en mouvement.

En effet, toutes les données que la science fournit sur la constitution des corps tendent à nous les représenter comme composés de molécules ou atomes maintenus à distance par des forces attractives et répulsives dépendantes de la chaleur et des affinités chimiques. Si ces forces viennent à varier, comme cela arrive indubitablement dans tous les phénomènes accompagnés d'un développement calorifique ou lumineux, les atomes pondérables passeront nécessairement de l'une à l'autre position d'équilibre par une série d'oscillations, et l'éther, qui environne le corps et pénètre dans tous les interstices moléculaires, se mettra aussitôt en vibration. L'origine du mouvement de l'éther devient ainsi une conséquence immédiate de l'état d'agitation soulevé dans l'intérieur des corps par les forces calorifiques et chimiques.

Et d'ailleurs, les partisans du système des ondulations ne conviennent-ils pas, ne sont-ils pas forcés de convenir, que la sensation de la lumière provient d'un ébranlement des particules qui constituent le nerf optique, ébranlement qui tirerait son origine de l'agitation imprimée à la rétine par le mouvement vibratoire de

chaleur obscure transmis par le verre noir. Il y a un seul cas dans lequel la coloration semble n'exercer aucune influence bien appréciable : c'est la lame du numéro 6,

l'éther? Or, quelque minces que soient les fibrilles élémentaires de la rétine, leur ténuité extrême ne peut certainement pas les soustraire à la loi de la pesanteur. Maintenant, puisqu'on admet que le mouvement se transmet de l'éther aux atomes pondérables pour concevoir la perception de la lumière, comment peut-on désigner par l'expression de *vraiment incroyable* la proposition inverse, mais parfaitement analogue quant au principe physique, que les molécules pondérables impriment aux molécules éthérées le mouvement producteur de la radiation lumineuse ?

Ajoutons enfin que, si les atomes des corps attirent et condensent autour d'eux une certaine quantité d'éther, comme le pensent plusieurs géomètres, ces atmosphères éthérées suivront nécessairement les atomes pondérables dans leurs excursions autour des positions d'équilibre et initieront, si l'on veut, par une action de l'éther sur l'éther, les mouvements vibratoires dont la propagation à travers ce milieu constitue le rayonnement de la lumière. Cependant la *cause première* des vibrations éthérées résidera toujours dans le mouvement des *molécules de matière pondérable* oscillant autour de leurs positions d'équilibre.

Mais *tout le monde doit admettre, il me semble,* dit M. Moigno, *que les molécules pondérables, en vibrant, donnent naissance aux phénomènes du son et non de la lumière.*

Ici je crois vraiment que l'ingénieux auteur de tant d'ouvrages utiles et si justement estimés du public studieux, n'a peut-être pas assez réfléchi, qu'entre *les molécules* et *les parties sensibles* des corps, il y a un abîme. Le son dérive, sans aucun doute, du mouvement vibratoire des corps graves. Mais de ce que les parties de la matière pesante *appréciables à nos sens* produisent des vibrations sonores, il ne s'ensuit pas que les vibrations de ses atomes ne puissent ébranler l'éther, et donner lieu aux phénomènes lumineux, sans exciter les phénomènes acoustiques ; au contraire, tout nous dit que ces lourdes oscillations *de masses* dues à la subdivision des corps en un certain nombre de parties vibrantes et propagées dans

qui donne la même transmission que le verre incolore. La matière verte, répandue dans cette lame, interceptant tout à fait, comme on l'a dit ci-dessus, l'orangé et le rouge du spectre solaire, possède donc la singulière propriété *de transmettre tous les rayons obscurs émergents du verre noir opaque.*

Cette propriété n'a rien d'étonnant pour nous, après ce que nous venons de remarquer à l'égard des absorptions et transmissions si bizarres exercées par les verres colorés, et notamment par le verre violet, sur la série des couleurs prismatiques. N'avons-nous pas vu cette dernière espèce de verre transmettre les rayons indigo et bleus, qui sont les couleurs supérieures ou plus réfrangibles, absorber les couleurs moyennes, vert, jaune et orangé, puis transmettre de nouveau le rouge inférieur ou la couleur moins réfrangible du spectre? De même le verre vert, qui laisse passer le vert avec une partie des couleurs adjacentes, absorbe l'orangé et le rouge moins réfrangibles que lui, et transmet de nouveau certaines espèces de radiations obscures encore moins réfrangibles. Les deux premières parties de cette proposition résultent de la simple inspection des couleurs prismatiques à travers le verre vert; quant à la dernière, elle se prouve moyennant un thermoscope placé au-delà de l'extrémité inférieure du spectre transmis par la même espèce de verre.

les milieux pondérables, n'ont rien de commun avec la prodigieuse rapidité des *oscillations moléculaires*, qui exigent pour se transmettre le secours d'un milieu excessivement rare et éminemment élastique, dont les fluides pesants les plus subtils ne sauraient nous offrir qu'une image grossière.

Ainsi, en rapportant la transmission de la chaleur obscure par le verre vert, à la transmission lumineuse du verre violet, nous y trouvons une analogie parfaite. Mais n'y a-t-il pas ici encore plus que de l'analogie?

La matière verte absorbe l'orangé et le rouge, et transmet le groupe de radiations obscures dont nous venons de parler. Si ces radiations affectaient la vue, elles auraient sans aucun doute une couleur particulière, et celui qui regarderait à travers notre lame verte recevrait une impression composée, résultant du mélange de cette nouvelle couleur avec la teinte actuellement visible de la lame. C'est ainsi que le rouge transmis par la lame violette se mêlant à l'indigo et au bleu, qui traversent cette même lame, donne la sensation du violet. *Les rayons obscurs, qui traversent notre verre vert, jouent donc exactement le même rôle que les rayons rouges dans le verre violet.* Or, si dans certains milieux colorés un groupe de rayons calorifiques peut se substituer à un groupe de rayons lumineux, ne semble-t-il pas évident que la thermochrôse et la coloration proprement dite ne sont qu'une seule et même chose?

Les transmissions, sensiblement égales du verre blanc et du verre vert pour la chaleur émergente du verre noir opaque, nous ramènent naturellement au résultat tout à fait analogue que nous avons obtenu en expérimentant sur le cristal de roche limpide et enfumé. Cette espèce minérale, s'étant montrée également perméable au rayonnement de la flamme, lorsqu'elle était colorée en brun ou formée de cristal parfaitement incolore, nous en avons conclu qu'elle transmettait une forte proportion de chaleur obscure, et que la teinte brune, que possèdent naturellement les

pièces de quartz enfumé, agissait sur cette chaleur obscure, comme le font certaines matières douées d'une couleur tranchante à l'égard de la lumière. On voit maintenant que l'une et l'autre de ces deux argumentations sont indirectement, mais complétement appuyées par la nullité d'action de la teinte verte du verre vert sur les rayons obscurs émergents du verre noir. A cela il faut ajouter qu'ici, comme dans le cas du verre vert, la coloration apparente du milieu changerait si les radiadiations obscures transmises pouvaient agir sur l'organe de la vue; et l'on verrait alors une couleur fortement prononcée remplacer la teinte brune des parties enfumées du cristal de roche.

Mais *ce qu'il importe surtout d'observer, par rapport à ces radiations obscures* TOTALEMENT TRANSMISSIBLES, *pendant que les autres sont toujours plus ou moins interceptées, c'est qu'elles présentent un phénomène de thermochrôse* PARFAITEMENT IDENTIQUE *avec le phénomène de coloration qu'offrent, dans des circonstances analogues, les radiations lumineuses.* On comprend que je veux parler de la transmission totale qu'une partie déterminée des couleurs prismatiques éprouve par l'action de certains milieux colorés; car, de même que notre verre vert n'oppose pas le moindre obstacle au passage des rayons de chaleur obscure émergents du verre noir, de même les verres rouges, d'une grande pureté, se laissent traverser par certaines radiations rouges du spectre solaire en aussi grande abondance que s'ils étaient complétement incolores.

Ces diverses considérations sur l'action calorifique et lumineuse des milieux colorés acquièrent un nouveau de-

gré de lucidité, lorsqu'on réfléchit, qu'en dernière analyse, la thermochrôse des milieux incolores et la diathermasie des milieux opaques se comportent elles-mêmes comme de véritables *matières colorantes*, exerçant leurs *actions électives* tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre, tantôt sur l'ensemble des deux radiations ; car, si certaines matières colorantes transmettent complétement une couleur prismatique, et d'autres une des espèces rayonnantes invisibles ; si certaines couleurs éteignent quelques espèces de lumière et transmettent parfois deux groupes distincts de rayons lumineux et parfois un groupe de rayons lumineux et un groupe de rayons obscurs ; d'un côté, *la thermochrôse des milieux incolores intercepte certains rayons obscurs et transmet le reste avec tous les rayons lumineux*, de l'autre, *la diathermasie des milieux opaques transmet un groupe de rayons obscurs et intercepte le groupe restant de cette espèce de rayons et le groupe entier des rayons lumineux.*

C'est dans cet admirable enchaînement des phénomènes de transmission que présentent les milieux diathermiques et les milieux diaphanes incolores et colorés, à l'égard des espèces lumineuses et obscures, c'est dans la parfaite similitude et les substitutions réciproques des forces d'où dérivent la coloration visible et la coloration invisible des corps, que l'on retrouve, à mon avis, l'une des plus belles preuves de l'identité de la lumière et de la chaleur rayonnante. De semblables rapports d'intimité entre les deux transparences et les deux colorations seraient tout à fait inconcevables, si la radiation calorifique différait essentiellement de la radiation lumineuse.

Pour terminer notre étude sur le tableau relatif aux

verres colorés, il ne nous resterait plus maintenant qu'à examiner les résultats fournis par les radiations émergentes du sel gemme et de la sélénite. Mais une discussion approfondie à cet égard serait inutile. En effet, nous savons qu'outre les radiations lumineuses, la sélénite transmet un certain nombre de rayons obscurs; on doit donc s'attendre à trouver dans la transmission de cette substance, des propriétés analogues à celles des flux calorifiques émergents de l'alun et du verre noir opaque; et, quant au sel gemme et à sa nullité d'action sur les proportions de chaleur transmise par une série de lames quelconques, il est bien connu qu'elle résulte de ses propriétés athermochroïques.

Nous ferons cependant une observation générale sur les matières colorantes, qui étant fondues et incorporées avec la pâte incolore du verre, forment les milieux colorés employés dans nos expériences.

Tous les verres colorés soumis aux radiations émergentes de nos cinq plaques transmettent moins de chaleur que le verre blanc, parce que les couleurs employées agissent en général comme forces absorbantes, et sur la chaleur lumineuse et sur la chaleur obscure. La transmission calorifique des rayons lumineux ne répond guère au degré de transparence des lames, parce que les diverses qualités de lumière n'ont pas des températures proportionnelles à leurs forces éclairantes. Quant à la chaleur obscure émergente du verre noir opaque, nous avons vu que toutes les couleurs opéraient sur elle d'une manière à peu près uniforme à l'exception d'une teinte verte particulière, qui leur livrait un passage entièrement libre.

Mais le verre noir ne laisse passer qu'une partie de la chaleur obscure rayonnée par la flamme et absorbe le reste.

Quelle est l'action des matières colorantes sur ces rayons interceptés de chaleur obscure, et sur les chaleurs rayonnantes des corps chauffés au-dessous de l'incandescence?

Pour le savoir il faudrait incorporer nos matières colorantes dans un milieu capable de transmettre les rayons obscurs absorbés par le verre noir, c'est-à-dire, qu'il faudrait les unir intimement avec le sel gemme; or, nous avons déjà observé que la constitution de cette substance ne se prête nullement à recevoir une coloration dans l'intérieur de la masse. Il ne serait pas non plus possible d'appliquer à sa surface une couche mince de chaque couleur rendue transparente par la cuisson, comme on le pratique à l'égard d'une certaine classe d'émaux transparents ou de verres colorés, récemment introduits dans le commerce. La solution générale du problème est donc impossible, ainsi que nous l'avions prévu au commencement de ce paragraphe.

Mais il y a une circonstance, toute particulière et toute exceptionnelle, ayant quelque analogie avec cette dernière méthode de colorer le verre, dans laquelle le sel gemme peut recevoir par apposition une couche mince et diathermique de matière colorante; et l'on va voir que les lames de sel gemme, ainsi préparées, fournissent des résultats très-importants pour la science des radiations calorifiques.

Que l'on se procure un entonnoir en tôle, dont le tuyau ait un à deux centimètres de diamètre, et cinq à six décimètres de longueur; et, après l'avoir renversé et fixé stablement à un soutien, que l'on mette au-dessous de l'entonnoir, à une certaine distance de son ouverture, une lampe d'Argant sans verre, avec la mèche

allongée outre mesure, afin d'avoir une flamme donnant beaucoup de fumée.

Celle-ci, emportée par le courant d'air ascendant, entrera dans l'entonnoir, parcourra le tuyau, et sortira par l'extrémité opposée beaucoup plus froide qu'elle n'était au moment de son introduction ; en sorte que, avec un peu d'adresse, on pourra alors la faire déposer uniformément sur la surface des corps les plus sujets à se fendre par l'action de la chaleur, sans y produire le moindre dégât.

Cela posé, qu'on approche du tube fumant une lame polie de sel gemme, et qu'on la fasse couvrir graduellement d'une couche de fumée de plus en plus épaisse, en tenant sans cesse la lame agitée afin que les voiles de matière colorante, qui se déposent successivement, prennent une distribution uniforme sur toutes les parties de la surface.

Si l'on suspend de temps en temps l'opération, pour regarder à travers la lame noircie, on verra d'abord très-nettement les objets environnants illuminés par la lumière diffuse ; plus tard leurs images disparaîtront, mais on distinguera encore les formes des corps incandescents. Celles-ci s'effaceront à leur tour, et le soleil se montrera seul à travers la couche de noir de fumée. Au-delà on n'aura plus que des couches complétement opaques.

Or, en soumettant les lames de sel ainsi préparées aux rayonnements calorifiques, on trouve qu'elles en transmettent des proportions plus ou moins grandes, selon la qualité de la radiation incidente.

Ces transmissions sont bien immédiates, rayonnantes, et par conséquent l'effet observé ne provient nullement de la chaleur, absorbée par la couche de noir de fumée et

rayonnée ensuite sur la pile thermoscopique à travers le sel. On peut le démontrer, avec la plus grande évidence, par les mêmes procédés que nous avons employés lorsqu'il s'agissait de la transmission du verre noir et d'autres corps opaques. D'abord, en retirant la pile un peu de côté, et en la laissant toujours tournée vers la lame enfumée, que l'on placera perpendiculairement à l'axe de la pile. Ensuite en fixant, entre la pile et la source, les ouvertures de deux écrans métalliques éloignés de un à deux décimètres, et en faisant promener de l'une à l'autre ouverture la lame de sel enfumé.

Dans la première expérience, l'index du rhéomètre tombe à zéro ; ce qui prouve irréfragablement, comme nous l'avons déjà observé au commencement de ce chapitre, que l'action manifestée lorsque la pile est placée sur l'axe du rayonnement calorifique ne dérive pas de l'échauffement du système de sel et de noir de fumée, mais qu'elle provient en totalité des rayons qui traversent ce système en conservant leur forme rayonnante.

Dans la seconde expérience, l'index rhéométrique se maintient exactement sur son angle de déviation, malgré le rapprochement ou l'éloignement de la plaque, confirmant ainsi d'une manière directe la conséquence déduite du fait précédent, relativement à la nullité d'action de la chaleur acquise par le sel enfumé sous l'influence du rayonnement incident.

Le passage immédiat de la chaleur, par les lames enfumées de sel gemme, étant parfaitement constaté par ces expériences préliminaires, nous allons examiner quelques résultats de l'observation.

TABLEAU VII

Numéros d'ordre	ASPECT des plaques de sel gemme enfumé sous le rapport de la transparence	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES (en centièmes de la radiation incidente)			
		pour la Lampe de Locatelli	pour le Platine incandescent	pour le Cuivre à 400°	pour le Cuivre à 100°
1	Diaphane	48	53	66	67
2	Peu diaphane	35	40	49	50
3	Très-peu diaphane	27	33	43	44
4	Diaphane pour la flamme	21	25	33	35
5	Diaphane pour les seuls rayons solaires	9,5	14	25	27
6	Complétement opaque	8	10	18	23
7	*Idem*	5	5,7	11	13
8	*Idem*	0,5	1,9	6,5	9
9	*Idem*	0	0	3	6
10	*Idem*	0	0	1,6	3,5

Avant de discuter les nombres contenus dans ce tableau, répondons à une difficulté que l'on a soulevée contre la transmission immédiate des couches minces de noir de fumée.

On a prétendu que la chaleur ne traversait pas la substance même de ce corps, mais qu'elle passait entre les interstices de ses particules. Pour se convaincre de la faiblesse d'une telle objection, il n'y a qu'à noter deux choses : 1° que si le passage des rayons avait lieu par

les espaces libres, la quantité de chaleur transmise serait constante, et nous voyons qu'elle varie considérablement avec la qualité de la chaleur incidente, 2° que la transmission calorifique immédiate s'effectue aussi par des lames enfumées *complétement opaques*, et dans ce cas il n'existe certainement pas des solutions de continuité alignées de manière à produire le phénomène de transmission observé, c'est-à-dire le passage des rayons calorifiques dans la seule direction normale aux deux surfaces de la lame.

On éprouve sans doute quelque surprise en voyant une lame *à surface dépolie* transmettre les radiations calorifiques comme les plaques *à faces polies*; mais les caractères de ces deux transmissions sont absolument les mêmes, et il est indubitable que les couches minces de noir de fumée transmettent la chaleur immédiatement, comme tout autre substance diathermique.

D'ailleurs, n'apercevons-nous pas nettement les images des corps à travers les lames enfumées de sel, de verre, ou de toute autre substance diaphane incolore, ne voyons-nous pas les objets blancs prendre, dans l'acte de la transmission, une teinte rougeâtre très-prononcée? Or, puisque ces images sont *distinctes*, la transmission lumineuse du sel enfumé s'accomplit comme celle des lames ordinaires, et puisqu'elles sont *colorées*, la lumière ne passe pas par les interstices libres de la *lame incolore* sur laquelle est appliqué le noir de fumée. En vain répondrait-on qu'il se produit un phénomène d'interférence analogue à ceux que présentent les réseaux, car alors on verrait des couleurs irisées ou des spectres, et on n'observe qu'une seule couleur parfaitement analogue à la teinte

uniforme que prennent les images des corps vus au travers des milieux colorés.

Maintenant, si ces couches minces de noir de fumée, déposées par la flamme, transmettent réellement la lumière à la manière d'un verre coloré, pourquoi ne transmettraient-elles pas les rayons de chaleur?

Observons de nouveau que *l'hypothèse du passage entre les interstices libres des particules charbonneuses est mathématiquement insoutenable pour le cas de la transmission des couches opaques ;* mais si le passage par la substance même du noir de fumée a lieu à travers les couches épaisses, ne doit-il pas s'effectuer, à plus forte raison, par les couches minces?

En comparant les transmissions de la même lame de sel enfumé, exposée successivement aux radiations des diverses sources, on voit que les quantités de chaleur transmises se rapprochent d'autant plus de l'égalité que la couche de noir de fumée devient plus mince. Ce résultat est parfaitement conforme aux lois déduites de nos expériences sur la transmission des milieux thermochroïques.

Mais un résultat beaucoup plus remarquable ressort des mesures contenues dans notre tableau : c'est que les rayons des sources à basse température traversent ces voiles de noir de fumée, déposés par la flamme, en plus grande proportion que les rayons des sources à température élevée. Les substances citées dans le tableau III nous ont offert des cas analogues ; mais alors il s'agissait uniquement des flux de chaleur provenant des flammes et des corps incandescents ; ici, le phénomène s'étend à toute espèce de chaleurs, en sorte que, d'un

bout à l'autre de la série des sources employées, nous voyons nos lames enfumées de sel gemme se comporter d'une façon diamétralement contraire aux transmissions du verre, de l'eau, du cristal de roche, et de presque tous les milieux thermochroïques.

Et cela ne saurait étonner nos lecteurs. Ne savent-ils pas maintenant que les actions thermochroïques sont des effets complexes tout à fait analogues aux couleurs des corps et des rayonnements lumineux?

Or, rien de plus usuel que de voir plusieurs verres, de couleurs différentes, mais possédant des éléments communs, l'indigo et le bleu par exemple, devenir toujours plus diaphanes lorsqu'on les interpose entre l'œil et une suite de lumières dans lesquelles les teintes bleues sont de plus en plus nombreuses et éclatantes; tandis qu'un verre jaune placé dans les mêmes circonstances se comporte précisément en sens contraire.

Il est vrai que la scène s'agrandit dans le cas qui nous occupe, puisqu'elle comprend la série entière des radiations calorifiques; mais la comparaison n'en devient pas pour cela moins exacte. Ainsi la chaleur lumineuse transmise en totalité par tous les milieux incolores, et certaines espèces de chaleurs obscures, d'autant plus nombreuses que la température de la source est plus élevée, représentent les éléments communs aux verres analogues. Quant à la substance agissant en sens contraire, sa propriété d'absorber les radiations lumineuses résulte évidemment de l'opacité qu'elle acquiert en s'accumulant à la surface des plaques de sel gemme.

Maintenant, si l'on veut bien se rappeller que le mica noir et le verre noir, qui opèrent sur les rayonnements

des sources de haute température comme le sel gemme enfumé sur la série entière des rayonnements calorifiques, absorbent, eux aussi, les radiations de chaleur lumineuse, il semble fort naturel d'en conclure que l'exclusion des rayons visibles est une des conditions nécessaires afin qu'un milieu transmette en plus grande abondance les rayonnements des sources de basse température que les rayonnements des sources à température élevée.

Mais nous verrons bientôt que la proportion de chaleur lumineuse, contenue dans les radiations des sources de haute température, est tellement faible par rapport à la chaleur obscure que rien ne prouve l'impossibilité de trouver, parmi les productions naturelles, des substances diaphanes incolores douées de la même propriété thermique que possède le sel gemme enfumé. Si de telles substances existent, leur action sur la série entière des radiations calorifiques sera parfaitement semblable à celle des verres violets, qui absorbent le milieu et transmettent les deux extrémités du spectre solaire.

La moitié des lames de sel gemme enfumé, citées dans notre tableau, étant tout à fait imperméables à la lumière, on comprend que la comparaison entre les flux calorifiques invisibles qui les traversent immédiatement, et les radiations pareillement invisibles émergentes des autres substances opaques, ou provenant des corps chauffés au-dessous de l'incandescence, doit être fort intéressante. Aussi allons-nous tâcher de l'établir dans les deux paragraphes qui suivent, avec toute l'exactitude que comportent les moyens actuels de l'analyse thermique.

§. 6.

Des radiations obscures mêlées aux radiations lumineuses.

Les corps opaques, maintenant connus, capables de transmettre la chaleur à l'état rayonnant sont au nombre de trois : le verre noir, le mica noir, et la poussière de charbon dans cet état particulier d'extrême finesse que lui donne la combustion des gaz provenant des corps gras. La profondeur susceptible de transmission varie considérablement de l'une à l'autre de ces trois substances. Certaines plaques de verre noir, épaisses de 8 à 10 millimètres, se laissent encore traverser par des quantités fort sensibles de chaleur rayonnante. Les lames de mica noir, épaisses de 2 à 3 millimètres, ne donnent plus, au contraire, aucune trace appréciable de chaleur transmise par voie immédiate; et le noir de fumée, déposé sur les lames de sel gemme, cesse d'être perméable aux rayonnements calorifiques lorsqu'il atteint une épaisseur ignorée, qui ne dépasse peut-être pas un dixième de millimètre. Cependant, comme les recherches expérimentales que nous allons entreprendre exigent une assez grande intensité dans les flux émergents, nous emploierons toujours les substances opaques en couches aussi minces que possible, sans nuire à leur *complète opacité*.

Ainsi, il ne faut jamais perdre de vue, que les lames de verre noir, de mica noir, et de sel gemme enfumé citées dans les tableaux suivants sont opaques dans toute la rigueur du terme. Interposées entre l'oeil et le

soleil le plus brillant, elles interceptent totalement la vue de cet astre; de telle sorte qu'étant soumises aux radiations des flammes et des corps incandescents, elles ne peuvent transmettre que des rayons de chaleur, dont l'*obscurité* est aussi indubitable que celle de la chaleur rayonnée par les sources calorifiques invisibles dans une chambre complétement privée de lumière.

Ces préliminaires posés, voici les transmissions fournies par nos trois substances opaques réduites à leur *maximum* de diathermasie, lorsqu'elles sont soumises aux radiations de la flamme d'huile, de la flamme d'alcool, et du platine incandescent.

TABLEAU VIII

NOMS des SUBSTANCES	Épaiss. en millim.	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES en centièmes de la radiation incidente		
		Flamme d'huile	Flamme d'alcool	Platine incandesc.
Sel gemme enfumé	»	8,9	11,8	12,1
Mica noir	0,19	43,8	62,8	52,5
Verre noir	0,62	37,9	52,6	42,8

Les rapports de ces trois transmissions sont:

8,9 : 43,8 : 37,9 : : 10 : 48 : 41 pour la flamme d'huile
11,8 : 62,8 : 52,6 : : 10 : 53 : 44 pour la flamme d'alcool
12,1 : 52,5 : 42,8 : : 10 : 47 : 35 pour le platine incand.

et varient par conséquent lorsqu'on passe de l'une à l'autre source.

L'idée de l'homogénéité des rayonnements calorifiques, dénués de lumière, était tellement dominante lorsque je découvris le passage immédiat et instantané de la chaleur rayonnante par les corps opaques, que l'on chercha à expliquer toutes les circonstances relatives à ce phénomène inattendu par de simples variations de quantité. Ainsi, d'après cette hypothèse, les milieux opaques seraient plus ou moins perméables à cette *espèce unique* de chaleur obscure mêlée aux radiations lumineuses; ils transmettraient moins étant soumis au rayonnement de la flamme d'huile qu'au rayonnement de la flamme d'alcool, parce que celle-ci donnerait une plus grande quantité de chaleur obscure; et leur transmission serait moins forte pour la première source de notre tableau que pour la dernière, parce que le platine incandescent donnerait une plus grande quantité de chaleur obscure que la flamme d'huile.

Mais il est facile de se convaincre que les différences de transmission observées ne peuvent guère s'expliquer par une simple altération dans la quantité de chaleur obscure propre à chaque rayonnement lumineux. En effet, on pourrait bien admettre que le mica noir est plus perméable à cette espèce unique de chaleur invisible que le verre noir, et celui-ci plus que le sel enfumé, et concevoir ainsi la cause des diverses quantités de chaleur transmises par les trois lames opaques sous l'action du même rayonnement. Mais la supposition d'une plus ou moins grande quantité de la même espèce de chaleur obscure, contenue dans le rayonnement de chaque source, exige de toute nécessité que les trois transmissions éprouvent des variations proportionnelles à leurs propres valeurs, en passant de l'un à l'autre rayonnement, et con-

servent ainsi invariables leurs relations mutuelles d'intensité. Or, les rapports de ces transmissions changent avec la qualité de la radiation incidente. Il y a donc variation de thermochrôse dans les milieux et dans les rayons obscurs qui parviennent à les traverser.

Ainsi, les différences de transmission de nos trois corps opaques ne dérivent pas d'une différence de diathermasie, mais d'un véritable changement de thermochrôse ou de *couleur calorifique*, invisible comme de raison, et totalement analogue à la variation de thermochrôse (pareillement invisible), d'où proviennent les différences de transmission des substances tout à fait limpides et incolores. C'est, pour ainsi dire, un seul phénomène en deux circonstances opposées; car, les conditions thermochroïques qui rendent le verre noir, le mica noir et le sel gemme enfumé perméables à l'une ou à l'autre espèce de rayons calorifiques, ne sauraient changer *l'opacité* de ces trois substances; de même que les *couleurs calorifiques* invisibles ne peuvent altérer *la limpidité* du verre, de l'eau ou du cristal de roche, à cause du manque de rapports entre les rayons de chaleur obscure et l'organe de la vue.

Maintenant je dis que, non seulement les milieux opaques et les rayonnements obscurs qui les traversent se distinguent entre eux par la thermochrôse, mais que chacune de nos sources lumineuses rayonne différentes espèces de radiations obscures, et que nos milieux opaques transmettent plusieurs de ces radiations; en sorte que les thermochrôses des milieux et des radiations transmises ne sont pas simples mais composées.

A la vérité une partie de cette proposition n'est qu'un corollaire de la précédente, car si la couleur thermique

du verre noir diffère de la couleur thermique du mica noir, et que toutefois ces trois substances donnent toujours une certaine transmission lorsqu'elles sont successivement exposées aux radiations de nos trois sources calorifiques, il faut nécessairement que chacune des sources rayonne des proportions diverses de ces espèces de chaleur transmissibles par les trois corps opaques.

Mais, outre qu'on ne saurait déduire d'une pareille argumentation la nature composée de la thermochrôse des milieux, les doutes et les obscurités, qui se présentent à chaque pas dans le champ encore inexploré d'une science nouvelle, nous engagent à rejeter cette démonstration partielle et indirecte, et à résoudre la question directement par l'expérience.

Pour donner une preuve irréfragable que les thermochrôses des milieux opaques et des radiations transmises de chaleur obscure sont composées et non simples, nous allons extraire d'abord du rayonnement lumineux de la lampe Locatelli trois radiations obscures de même intensité, au moyen de nos trois corps opaques plus ou moins rapprochés de la source rayonnante, et mesurer les quantités de chaleur transmises dans ces trois cas par la même série de lames, transparentes ou opaques peu importe, puisque les rayons sur lesquels on opère ne renferment plus la moindre trace de lumière. Après les considérations précédentes on comprendra de suite que si le rayonnement exploré de la lampe contient une seule espèce de chaleur obscure, chaque lame de notre série soumise aux trois radiations émergentes devra fournir des transmissions égales.

En effet, comme dans l'hypothèse de l'homogénéité

du flux de chaleur obscure rayonné par la flamme d'huile, les différences de transmission des trois corps opaques dérivent uniquement de leurs divers degrés de transcalescence, il est manifeste qu'en faisant disparaître de telles différences par un rapprochement convenable de la source de chaleur ; on aura trois radiations identiques en force et en qualité, qui se comporteront exactement de la même manière, et passeront, par conséquent, dans la même proportion à travers le même corps.

Mais si la chaleur rayonnante obscure de la flamme se compose de plusieurs espèces de rayons, chacun de nos trois milieux opaques choisira celles qui sont le plus appropriées à sa thermochrôse particulière, et absorbera le reste; en sorte que les trois radiations émergentes, n'étant plus indentiques, quoique douées de la même intensité, pourront fort bien passer en proportions diverses par une lame thermochroïque donnée. Voilà aussi ce qui ressort d'une manière éclatante des mesures contenues dans le tableau suivant.

TABLEAU IX.

NOMS des substances interposées	Épaisseurs en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES pour 100 rayons de la flamme d'huile émergents		
		du sel enfumé	du mica noir. épaisseur 0,32 mill.	du verre noir. épaisseur 0,73 mill.
Sel gemme enfumé	»	30,2	11,2	8,3
Mica noir	0,188	66,7	75,0	70,0
Mica incolore	0,338	65,1	74,8	76,6
Verre noir	0,620	51,8	60,1	63,4
Verre incolore	0,696	45,3	58,2	66,7
Même espèce	5,640	21,7	12,7	22,0
Cristal de roche	3,008	28,6	41,6	55,3
Sélénite	0,188	45,4	36,0	45,0
Même espèce	0,808	20,1	8,7	13,0
idem	7,614	15,0	0,0	1,3
Ambre jaune	6,580	12,0	0,0	2,7
Alun	4,700	10,0	0,0	0,0

Pas une des douze lames qui forment notre série ne transmet, comme on voit, la même proportion des radiations émergentes des trois milieux opaques ; les différences varient plus ou moins , mais elles n'ont aucun rapport avec la nature ou l'état de transparence de la plaque. Les données relatives au verre noir et au mica noir feraient bien croire, au premier abord, que les transmissions des milieux opaques se rapprochent plus de l'égalité que celles des autres corps. Mais , d'un côté , le même degré de tendance à l'égalité se montre aussi dans les transmissions du mica incolore et de la première lame de sélénite; et de l'autre, on voit le sel gemme enfumé donner des transmissions aussi divergentes que celles des milieux transparents.

Les plus grandes différences sont fournies par les plaques épaisses, et ceci rentre parfaitement dans les lois connues de la thermochrôse.

Cependant, lorsqu'on compare entre elles les quantités de chaleur transmises par différentes épaisseurs d'une même substance, successivement exposée aux radiations émergentes des trois lames opaques, on arrive à un résultat extrêmement remarquable. En effet le nombre 45,3 qui représente la transmission de la première lame de verre incolore, soumise au rayonnement qui sort du sel enfumé, est à peu prés double du nombre 21,7 représentant la quantité de la même espèce de chaleur transmise par la seconde lame de la même substance, mais sept fois environ plus épaisse. Or, le rapport entre les transmissions de ces deux lames de verre incolore devient 3 : 1 sous le rayonnement qui sort du verre noir; et 4, 5 : 1 sous la radiation émergente du mica noir. Les variations se manifestent avec des apparences encore plus frappantes dans la sélénite, où le premier et le troisième flux, c'est-à-dire les radiations émergentes du sel gemme enfumé et du verre noir, passent en quantités sensiblement égales par la lame la plus mince, et traversent la plus épaisse dans la proportion de 12 : 1 !

Il y a enfin parmi les données expérimentales de notre tableau un dernier fait qui ne saurait être passé sous silence, à cause des inductions erronées que l'on pourrait en tirer contre certaines données fondamentales de notre théorie de l'identité.

Après avoir mis en évidence les différences si tranchées que présentent les milieux plus ou moins limpides relativement au passage des rayons lumineux et calorifiques, nous avons vu ces différences s'effacer, pour ainsi dire, lorsqu'on

expérimentait sur les radiations émergentes d'une lame d'alun ou d'une couche d'eau d'une épaisseur convenable. De telles radiations se montrèrent, en effet, douées de toutes les propriétés que possède la lumière à l'égard des substances diaphanes ou opaques; c'est-à-dire qu'elles étaient arrêtées complétement par ces dernières, et qu'elles traversaient toutes les lames parfaitement limpides en proportions sensiblement égales. Ces expériences rapprochées de l'imperméabilité de l'alun et de l'eau, pour les rayonnements des corps chauffés au-dessous de l'incandescence, nous induisirent à admettre que l'eau et l'alun absorbent tous ou presque tous les rayons calorifiques invisibles, et fournissent ainsi, dans la ressemblance parfaite des lois de transmission lumineuse et calorifique des rayons de lumière qui en émergent, un argument favorable à l'unité de la cause productrice de ces deux modes de manifestation que possède le rayonnement des corps incandescents.

Maintenant nous voyons, par le dernier chiffre de la seconde colonne numérique du tableau IX, que l'alun transmet 10/100 de la radiation invisible qui sort de l'une des trois substances opaques. Ne faut-il pas en conclure que notre supposition n'était point admissible ?

D'abord il importe de remarquer que ces dix rayons de chaleur qui traversent l'alun ne se rapportent pas au rayonnement direct de la source, mais à la radiation émergente du sel gemme enfumé; or, nous savons, par un des tableaux précédents (VIII), que cette substance, dans l'état où nous l'avons constamment employée, livre passage à 8,9 parties sur 100 du rayonnement direct. Donc les 10 parties transmises de chaleur obscure ne sont effectivement que 10/100 de 8,9/100 ou 0,0089, c'est-à-dire, une fraction de la centiè-

me partie du rayonnement de la lampe. Rappellons, en outre, que l'énoncé de notre proposition n'est pas absolu ; et nous ne trouverons, dans les quelques traces de chaleur que notre lame d'alun transmet, rien de contradictoire avec le principe adopté relativement à l'absorption *presque totale* de toute espèce de chaleur obscure par l'action de cette substance.

Les expériences dont nous venons de discuter les résultats, répétées avec les mêmes plaques sur les radiations de la flamme d'alcool et du platine incandescent, transmises par les trois lames *complétement opaques* de sel gemme enfumé, de mica noir et de verre noir, m'ont fourni les données que renferment les deux tableaux ci-après.

TABLEAU X.

NOMS des substances interposées	Épaisseurs en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES pour 100 rayons de la flamme d'alcool émergents		
		du sel enfumé	du mica noir. épaisseur 0,32 mill.	du verre noir. épaisseur 0,73 mill.
Sel enfumé	»	19	12	13
Mica noir	0,188	63	75	73
Mica incolore	0,338	63	75	73
Verre noir	0,620	50	54	64
Verre incolore	0,696	40	46	58
Même espèce	5,640	7,5	5,5	8
Cristal de roche	3,008	20	21	34
Sélénite	0,188	31	22	28
Même espèce	0,808	10	1,5	3
idem	7,614	7	0	0
Ambre jaune	6,580	5,8	0	0
Alun	4,700	0	0	0

TABLEAU XI.

NOMS des substances interposées	Épaisseurs en millimètres	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES pour 100 rayons du platine incandescent émergents		
		du sel enfumé	du mica noir. épaisseur 0,32 mill.	du verre noir. épaisseur 0,73 mill.
Sel enfumé	»	27	10	10
Mica noir	0,188	53	80	73
Mica incolore	0,338	40	75	77
Verre noir	0,620	27	67	70
Verre incolore	0,696	25	66	43
Même espèce	5,640	3	13	33
Cristal de roche	3.008	22	60	78
Sélénite	0,188	35	44	57
Même espèce	0,808	10	11	23
idem	7,614	3	1,3	3
Ambre jaune	6,580	0,6	0	1
Alun	4,700	0	0	1,7

On peut appliquer à ces deux tableaux la plupart des réflexions qui nous ont été suggérées par la comparaison des nombres rapportés dans le tableau précédent ; réflexions qui tendent toutes à mettre en vue, moyennant les différences de transmission des flux calorifiques émergents de nos trois milieux opaques, l'hétérogénéité de la chaleur obscure mêlée à la lumière de chaque source. Il y a même des cas où cette hétérogénéité apparaît sous un aspect encore plus piquant que dans le premier tableau. Tel est, par exemple, celui qu'offrent les deux lames de verre incolore sous l'action des rayonnements obscurs tirés de la flamme d'alcool, car on y voit la plaque mince et la plaque épaisse d'une même substance donner des variations opposées. En effet,

opère-t-on avec la lame mince, elle transmet en plus grande quantité la chaleur émergente du mica noir que celle qui sort du sel gemme enfumé. S'agit-il de la plaque épaisse, elle se comporte précisément en sens contraire, et transmet plus le rayonnement qui sort du sel gemme enfumé que la radiation émergente du mica noir.

Mais ce paradoxe apparent devient pour nous un phénomène très-facile à expliquer, puisque les diverses espèces de rayons obscurs extraites du rayonnement de la flamme d'alcool, ou de toute autre source lumineuse, par le moyen des substances opaques, peuvent s'éteindre plus ou moins rapidement dans l'intérieur du même milieu ; et rien ne s'oppose à ce que le flux plus absorbable par ce milieu ne soit en même temps le plus intense, et ne pénètre d'abord les premières couches en plus grande proportion que le flux moins intense et moins absorbable. Mais celui-ci éprouvant une absorption moindre à mesure qu'il avance dans l'intérieur, on conçoit aisément qu'à une certaine profondeur il pourra fort bien atteindre et surpasser en intensité le flux à extinction rapide, et renverser ainsi l'ordre des transmissions initiales.

Les radiations obscures tirées du platine incandescent comparées avec celles qui proviennent de la flamme d'huile présentent, elles aussi, quelques faits assez intéressants de variations inverses, sur lesquels nous allons fixer un instant l'attention du lecteur, ne serait-ce que pour dissiper les derniers restes de croyance qu'il pourrait encore conserver sur une prétendue dissemblance entre les actions que les lames enfumées de sel gemme et les lames polies de toute autre substance diathermique exercent sur la chaleur rayonnante.

Les flux obscurs provenant de la flamme d'huile et du platine incandescent, transmis par le sel enfumé et le verre noir, montrent, relativement à leur rapidité d'absorption dans l'intérieur du verre incolore, des effets alternativement contraires; de sorte que, tantôt c'est la radiation émergente du sel gemme enfumé qui diminue le plus rapidement, et tantôt la radiation émergente du verre noir. Cela résulte de la simple inspection des nombres représentant les huit quantités de chaleur qui traversent notre couple de lames de verre incolore sous l'action des deux sources; puisque les doubles transmissions de ce couple, dans le cas de la flamme d'huile, sont d'après le tableau IX : 45 et 22 pour le sel enfumé, 67 et 22 pour le verre noir. Tandis que, dans le cas du platine incandescent, les transmissions du même couple de lames sont, comme on peut le voir par le tableau XI: 13 et 33 pour la chaleur du verre noir, et 25 et 3 pour la chaleur du sel enfumé.

Nous avons vu la plaque d'alun transmettre une partie de la radiation obscure émergente du sel enfumé soumis au rayonnement de la flamme d'huile, et absorber en totalité la radiation, pareillement obscure, qui sort du verre noir. C'est précisément le contraire pour les chaleurs émergentes des mêmes lames sous l'action du rayonnement du platine incandescent; car alors nous voyons l'alun transmettre quelques traces de la chaleur qui sort de la lame opaque de verre noir, et intercepter complétement la chaleur qui sort de la lame, pareillement opaque, de sel gemme enfumé.

La seconde lame de sélénite exposée aux radiations obscures du sel enfumé et du verre noir donne 20 et 13

dans le premier tableau, et 11 et 23 dans le dernier; c'est-à-dire, que la plus grande transmission de cette plaque se produit, tantôt sous l'action du rayonnement sortant du verre noir, et tantôt sous l'action du rayonnement sortant du sel enfumé.

Il résulte de ces dernières considérations, d'abord, que puisque les rayons qui sortent du sel gemme enfumé sont transmis par les mêmes milieux, en quantités alternativement plus grandes et plus petites que les rayons émergents du mica noir et du verre noir, ces deux flux calorifiques ne présentent aucun caractère d'où l'on puisse déduire qu'ils appartiennent à des classes essentiellement distinctes. Le sel gemme enfumé agit donc comme tout autre plaque diathermique à surfaces polies, et ne fait qu'isoler, par une force absorbante propre au voile de noir de fumée qui recouvre une de ses surfaces, certaines espèces de rayons obscurs.

Mais la conséquence générale résultant de l'ensemble des expériences contenues dans ce paragraphe, c'est que *tout rayonnement vibré par une source lumineuse contient diverses espèces de chaleurs obscures;* ce qui confirme complétement les idées que nous avons adoptées sur l'origine de la diathermasie et de la thermochrôse des milieux opaques et des substances diaphanes incolores.

La démonstration directe de l'existence de plusieurs sortes de rayons invisibles de chaleur dans la radiation des sources lumineuses, rapprochée des conclusions relatives à l'intimité des liens qui réunissent ensemble la thermochrôse des milieux incolores et l'action des couleurs, me semble de nature à lever tous les doutes que l'on pourrait encore conserver sur l'exactitude de notre théorie.

Il ne reste plus qu'à déterminer les quantités relatives de rayons visibles, et de rayons invisibles, propres aux flux calorifiques des sources lumineuses.

La constance du rapport de transmission pour toute sorte de chaleur, et l'égalité des propriétés thermochroïques de la radiation incidente et de la radiation émergente, prouvent que le sel gemme limpide et incolore transmet la série entière des éléments lumineux et des éléments obscurs. D'autre part, puisque la thermochrôse des milieux diaphanes incolores dérive de la présence des rayons obscurs, et que l'alun, tout aussi limpide que le sel gemme, transmet de la chaleur sensiblement privée de toutes les affections thermochroïques propres au rayonnement direct, il s'ensuit que les rayons calorifiques émergents de ce dernier milieu sont formés des seuls éléments lumineux. *Nous savons d'ailleurs que toutes les espèces de chaleur rayonnante éprouvent sur les diverses surfaces des milieux diathermiques des réflexions à peu près égales.* La chaleur lumineuse sera donc représentée par la transmission de l'alun, et la chaleur obscure, par la différence de transmission entre l'alun et le sel gemme. Mais nous voyons, dans le tableau I, que sous l'action du rayonnement de la lampe de Locatelli, le sel gemme transmet 0,92 et l'alun 0,09. La radiation de la flamme d'huile contient donc 0,09 de chaleur lumineuse et 0,92—0,09=0,83 de chaleur obscure.

En appliquant le même raisonnement aux résultats numériques du tableau III, on trouve que le platine incandescent et la flamme d'alcool rayonnent, à travers le même couple de lames, de sel gemme et d'alun, 0,02 et 0,01 de chaleur lumineuse, et 0,91 et 0,92 de chaleur obscure.

Pour comparer plus aisément ces diverses qualités de chaleurs rayonnantes, il n'y a qu'à représenter par 100 la somme des rayons lumineux et obscurs appartenant à chacune des trois sources calorifiques. On obtient alors les nombres indiqués par le petit tableau qui suit.

SOURCES CALORIFIQUES	QUANTITÉ DE RAYONS	
	lumineux	obscurs
Flamme d'huile	10	90
Platine incandescent	2	98
Flamme d'alcool	1	99

Si les diverses espèces de rayons invisibles de chaleur pouvaient agir sur nos yeux dans le même rapport que les rayons visibles, l'intensité de la lumière augmenterait donc 9 fois pour la flamme d'huile, 49 fois pour le platine incandescent, et 99 fois pour la flamme d'alcool!

À ceux qui soupçonneraient un excès en plus dans la valeur de ces quantités, nous répondrions que ces valeurs résultent de la détermination d'une *limite inférieure* où l'erreur ne peut jamais avoir lieu qu'en moins. En effet, la chaleur obscure contenue dans le rayonnement de chaque source lumineuse a été calculée par la différence entre les transmissions du sel gemme et de l'alun : nous avons, par conséquent, supposé que toute la chaleur émergente de cette dernière substance appartenait à des espèces lumineuses ; mais rien ne nous assure que des rayons invisibles de chaleur ne traversent l'alun, et ne

se montrent doués des mêmes propriétés de transmission et d'absorption que possèdent les rayons lumineux. La petite différence que nous avons trouvée dans le paragraphe précédent entre les transmissions calorifiques de la partie incolore et de la partie colorée de notre cristal de roche enfumé, et l'infériorité de la transmission calorifique des lames opaques, par rapport aux proportions de chaleur obscure calculées dans les deux dernières pages du paragraphe actuel, semblent même venir à l'appui de cette hypothèse.

Ainsi, il pourrait bien y avoir une certaine différence entre la quantité d'éléments invisibles qui existent dans le rayonnement d'une source lumineuse et la quantité déduite de la comparaison des rayons calorifiques transmis par le sel gemme et l'alun ; mais cette différence tendrait à augmenter et non pas à diminuer les proportions indiquées tantôt.

La supériorité des éléments invisibles sur les éléments visibles dans les flux calorifiques de nos sources lumineuses étant ainsi établie sur des bases incontestables, nous en conclurons que le règne de la thermochrôse sur les substances diaphanes est beaucoup plus étendu que celui des couleurs ordinaires.

Cette conclusion s'accorde admirablement bien avec l'idée fondamentale développée dans le § 4 du présent chapitre, savoir: que la limpidité de l'eau, du verre et de la plus grande partie des milieux transparents et incolores, n'est qu'un cas de *coloration partielle*, c'est-à-dire, l'*action négative* d'une classe particulière de couleurs, insensibles à l'organe de la vue, qui se comportent, relativement à la série entière des chaleurs lumineuses, comme la ma-

tière colorante de certains verres rouges sur le rouge extrême du spectre solaire, et qui offrent ainsi un passage entièrement libre aux diverses espèces d'éléments lumineux, tout en absorbant des proportions plus ou moins grandes des éléments obscurs que renferme le rayonnement des flammes et des corps incandescents ; et que c'est aux relations d'homogénéité et d'hétérogénéité existant entre les colorations invisibles de ces diverses espèces d'éléments obscurs et les teintes variées et pareillement invisibles des substances dont se compose la classe des milieux incolores, que l'on doit attribuer les énormes différences observées entre les transmissions calorifiques des corps limpides et dénués de la moindre trace de couleur apparente.

§. 7.

Des radiations obscures provenant des corps chauffés au-dessous de l'incandescence.

La première considération à faire sur les rayonnements des sources obscures, c'est qu'ils ne sont pas identiques: cela résulte évidemment des données contenues dans les dernières colonnes des tableaux I et VII: Afin que le lecteur puisse en juger plus aisément par lui-même, je vais les réunir ici dans un seul tableau.

TABLEAU XII.

NOMS des substances interposées (épaisseur commune 2,6 mill.)	TRANSMISSIONS CALORIFIQUES en centièmes de la radiation incidente POUR LA SOURCE à 400°	à 100°
Sel gemme pur	92,3	92,3
» impur	65	65
» enfumé diaphane	23	27
» enfumé opaque	18	23
» *idem*	6,5	9
» *idem*	3	6
Soufre cristallisé de Sicile	60	54
Spath fluor très-pur	42	33
idem verdâtre	24	20
idem vert foncé, veiné, impur	4	3
Chromate acide de potasse	15	0
Béril jaune verdâtre	13	0
Borate de soude louche	8	0
Feldspath adulaire louche veiné	6	0
Cristal de roche	6	3
Verre	5	0
Topaze blanche	4	0
Sulfate de baryte louche	3	0
Aigue-marine vert bleuâtre	2	0

Excepté les deux premières lames dont l'égalité de transmission est due à l'absence de thermochrôse du sel gemme, toutes les substances inscrites dans ce tableau transmettent les rayonnements des deux sources calorifiques en proportions différentes.

Il y a même plusieurs cas dans lesquels la radiation de la source inférieure, c'est-à-dire la radiation de la source de plus basse température, est totalement interceptée, pendant que l'autre passe encore en quantité sensible à travers le corps, ce qui distingue alors les deux rayonnements d'une manière on ne peut plus décisive, sans que l'on puisse pourtant en déduire aucune conséquence sur *leurs différences d'aptitude à franchir les obstacles interposés*. Car, les plaques enfumées de sel gemme sont traversées en plus grande proportion par la chaleur rayonnante de la source à 100 degrés, que par la radiation calorifique de la source à 400 degrés.

Maintenant il est clair que les différences observées pourraient provenir de ce que chacune des deux radiations se compose d'une qualité particulière de chaleur ; ou bien de ce que les diverses espèces élémentaires, qui entrent dans la composition de l'un de ces flux calorifiques diffèrent, en qualité et en quantité, des diverses espèces élémentaires qui concourent à la formation de l'autre. Il faut donc décider, avant tout, si les radiations sont simples ou composées.

Les tableaux suivants contiennent les proportions de chaleur que fournissent les deux rayonnements, libres ou émergents de diverses substances diathermiques, en traversant une même série de lames douées de différentes thermochrôses.

TABLEAU XIII.

NOMS des substances interposées	Épaisseurs (en millimètres)	TRANSMISSIONS DE LA SOURCE à 400° (en centièmes de la quantité incidente) POUR LE RAYONNEMENT				
		direct	émergent			
			du soufre épaiss. 7,286	du spath fluor épaiss. 3,892	du sel gemme enfumé	du mica épaiss. 0,0398
Soufre	6,893	43,1	70,2	59,2	47,4	61,4
Spath fluor	3,812	31,7	48,8	51,5	26,8	61,8
Mica blanc	0,029	45,3	58,7	70,1	39,5	81,6
idem	0,253	15,5	21,2	27,0	13,1	32,5
Mica noir	0,029	40,2	57,4	63,6	34,0	72,4
idem	0,108	27,1	41,3	49,2	26,1	56,5
Sélénite	0,199	12,5	18,8	18,7	10,2	20,7
idem	0,358	8,3	12,3	13,0	6,3	14,4
idem	0,712	3,2	4,9	6,3	2,8	5,5
Cristal de roche	0,619	12,3	14,7	16,4	6,9	31,2
idem	3,157	6,9	9,5	10,5	6,0	14,6
Sel enfumé	»	29,7	30,3	24,0	28,9	25,1
Verre noir	0,596	10,3	10,8	15,9	8,5	21,2
idem	1,914	4,9	6,2	7,6	5,0	11,4
Verre blanc	0,845	7,2	8,9	11,6	4,8	17,3

TABLEAU XIV

NOMS des substances interposées	Épaisseurs (en millimètres)	TRANSMISSIONS DE LA SOURCE à 100° (en centièmes de la quantité incidente) POUR LE RAYONNEMENT direct	émergent du soufre épaiss. 7,286	du spath fluor épaiss. 3,892	du sel gemme enfumé	du mica épaiss. 0,0398
Soufre	6,893	39,9	72,4	78,5	50,1	66,3
Spath fluor	4,812	26,4	49,8	66,7	30,3	63,7
Mica blanc	0,027	31,2	57,5	81,3	40,0	72,5
idem	0,255	11,2	27,6	37,6	15,2	31,3
Mica noir	0,029	31,0	58,7	76,4	40,6	65,2
idem	0,108	18,9	45,2	55,2	28,3	47,6
Sélénite	0,199	10,5	23,3	27,0	15,1	34,3
idem	0,358	5,8	19,2	25,2	12,6	22,4
idem	0,712	5,0	13,4	11,9	9,5	11,8
Cristal de roche	0,619	6,8	22,7	27,6	7,2	34,4
idem	3,157	4,0	17,0	15,1	12,0	11,3
Sel enfumé	*n*	32,2	34,6	36,3	46,2	35,7
Verre noir	0,596	5,6	18,9	22,5	11,7	21,5
idem	1,914	2,5	15,2	19,0	10,3	11,2
Verre blanc	0,845	5,1	18,5	19,2	9,3	14,4

Remarquons d'abord que les résultats contenus dans ces tableaux rendent de plus en plus manifeste la qualité différente des flux calorifiques rayonnés par les sources à 400 et à 100 degrés.

Nous voyons, en effet, le rayonnement de la première source acquérir, par rapport aux quinze lames de la série soumise à l'expérience, une plus grande transmissibilité après sa sortie du soufre, du spath fluor et du mica, et devenir moins transmissible par ces mêmes lames lorsqu'il sort du sel gemme enfumé. Une variation analogue de transmissibilité se montre aussi dans les chaleurs émergentes qui proviennent du rayonnement de la source à 100 degrés; mais, d'un côté l'augmentation surpasse celle de la source à 400 degrés, et de l'autre la diminution manque complétement. Il s'ensuit que les quantités de chaleur transmises par les mêmes lames présentent, à l'égard des deux sources, une marche ascendante ou descendante, selon que les rayonnements sont explorés immédiatement ou après leur sortie des diverses lames indiquées dans les tableaux; car les transmissions de la source à 100 degrés sont généralement inférieures aux transmissions de la source à 400 degrés pour les radiations directes, et supérieures pour les radiations transmises. L'opposition la plus remarquable a lieu dans le cas du sel gemme enfumé, puisqu'alors les quantités relatives à la radiation transmise sont supérieures à celles de la radiation directe pour la source à 100 degrés, et inférieures pour la source à 400 degrés.

Si l'on veut maintenant se rappeller ce qui a été dit tantôt, afin de montrer que l'hypothèse d'une seule espèce de chaleur pour les rayonnements obscurs des sour-

ces lumineuses ne saurait se soutenir, on n'éprouvera aucune difficulté à interpréter le sens des données expérimentales contenues dans nos tableaux.

En effet, supposons que les différences des nombres que renferme la colonne des transmissions directes proviennent d'une seule espèce de chaleur traversant en proportions plus ou moins grandes les quinze lames de la série: il en ressortira aussitôt la conséquence d'une égalité parfaite de tous les nombres inscrits sur la même ligne transversale de chaque tableau.

Or, ces nombres ne sont guère égaux, et présentent au contraire de très-grandes variations. Donc les radiations des sources à 400 et à 100 degrés contiennent plusieurs espèces de chaleurs, et leurs thermochrôses sont complexes comme celles des sources lumineuses.

Si l'on ne prenait en considération que les seuls résultats des deux derniers tableaux, les différences observées s'expliqueraient fort bien par de simples changements de proportion entre les mêmes éléments calorifiques. Mais puisque le tableau I, d'où nous avons extrait en grande partie le tableau XII, montre que certains corps sont adiathermiques pour le rayonnement de la source à 100 degrés, tout en se laissant encore traverser par des quantités notables du rayonnement de la source à 400 degrés, il faut bien admettre que les espèces, transmises par ces corps sous l'action de la dernière source, manquent dans les radiations de la première, et que, par conséquent, le phénomène dérive, non seulement d'une variation d'intensité, mais aussi d'une variation de qualité dans les espèces élémentaires qui constituent les deux flux rayonnants.

Des conclusions analogues s'appliquent aux sources supérieures ; car l'ensemble des observations nous apprend que la quantité des milieux solides et liquides susceptibles de transmettre la chaleur est la plus grande possible pour le rayonnement de la flamme, un peu moindre pour le rayonnement du platine incandescent, et encore moindre pour celui du cuivre chauffé au-dessous de l'incandescence.

Ainsi, *les radiations calorifiques de nos sources sont toutes hétérogènes, c'est-à-dire composées de plusieurs sortes de rayons elémentaires; mais le nombre des espèces propres à chacune de ces radiations augmente avec la température de la source.*

Il faut bien se garder de confondre la dernière partie de cette proposition avec le principe erroné de Delaroche sur la *transmissibilité croissante* de la chaleur rayonnée par les sources *à mesure que la température augmente*; car un rayonnement peut être plus riche qu'un autre en variétés élémentaires, et contenir toutefois une moindre proportion des espèces transmissibles par telle ou telle substance ; de manière que l'infériorité de température n'entraîne pas nécessairement une infériorité de transmission pour toute sorte de milieu. C'est ainsi que les radiations des sources obscures passent à travers le sel gemme enfumé en plus grande proportion que les radiations des sources lumineuses.

De toute manière, on comprendra maintenant pourquoi la proportion de chaleur transmise par le même corps subit ordinairement une augmentation lorsqu'on approche de l'incandescence, et pourquoi plusieurs substances ne sont perméables qu'aux rayonnements des sources

de haute température. L'intensité et la variété des transmissions calorifiques augmentent, en général, avec le degré de chaleur de la source rayonnante parce que les quantités et les qualités des radiations élémentaires deviennent de plus en plus nombreuses à mesure que la température s'élève.

Cette explication, déduite de nos expériences thermochroïques, reçoit une confirmation frappante par les belles observations de M. Draper sur la coloration d'un fil de platine rendu de plus en plus chaud et lumineux dans une chambre obscure par l'action d'un courant électrique d'intensité croissante; car l'image de ce fil, vue au travers d'un prisme, donne un spectre, qui est d'abord très-court et se compose des seules teintes rouges, mais qui s'alonge ensuite en développant successivement le jaune, le vert, le bleu et le violet, et devient de plus en plus vif et brillant (*); en sorte que le phénomène de l'accroissement d'intensité et de variété dans les rayons élémentaires de la source à mesure que la température augmente est on ne peut plus évident pour toute la série des rayons calorifiques capables d'agir sur l'organe de la vue.

Mais revenons à nos deux flux rayonnés par les lames métalliques chauffées à 400 et à 100 degrés.

L'hétérogénéité de ces flux calorifiques obscurs, résultant des données insérées dans les derniers tableaux, soulève une question d'un grand intérêt pour la théorie de la chaleur. En voyant les radiations de deux sources obscures différer par la qualité de leurs éléments, ne faut-il pas en conclure que la même chose a lieu

(*) *The London, Edin. and Dub. phil. mag. and journal of science N. 202. May. 1847.*

pour toutes, et qu'ainsi les corps chauffés de quelques degrés au-dessus de la température ordinaire rayonnent des qualités de chaleur différentes de celles que vibrent ces mêmes corps portés à 100 degrés?

L'accroissement d'énergie, que manifeste la radiation d'un corps dont la température s'élève, peut se concevoir de deux manières bien distinctes, savoir: par l'*augmentation de force* des rayons existants, et par l'*addition d'espèces nouvelles*. Nous savons que l'apparition de rayons nouveaux a lieu indubitablement lorsque la température de la source passe de 100 à 400 degrés; mais rien ne nous assure que le même phénomène se produise entre 0 et 100 degrés; de telle sorte que toutes les radiations des sources, qui possèdent des températures inférieures à celle de l'eau bouillante, pourraient fort bien avoir des compositions sensiblement égales et ne différer entre elles que par l'intensité.

Il paraîtrait même que les choses se passent réellement ainsi: car, en soumettant les rayonnements calorifiques des corps, chauffés au-dessous de 100 degrés, à des épreuves analytiques semblables à celles dont les résultats sont consignés dans le tableau XII, on ne trouve entre leurs propriétés de transmission aucune différence appréciable. Remarquons toutefois que ces épreuves sont très-délicates, et que, pour tâcher de les rendre concluantes, il est d'abord indispensable de les soustraire complétement à l'action d'une cause d'erreur que nous n'avons pas mentionnée dans les études précédentes, parce qu'elle n'y exerçait, comme on va le voir, aucune influence. Cette nouvelle cause d'erreur, c'est l'obliquité plus ou moins grande sous laquelle les rayons divergents des faisceaux calorifiques comparés rencontrent la lame.

Que l'on se procure une plaque parfaitement pure et limpide de sel gemme, et qu'on la pose verticalement, comme nous l'avons fait jusqu'ici dans les expériences de transmission, sur un soutien, derrière l'ouverture de l'écran situé entre la source de chaleur et la pile thermoscopique. On devra seulement donner à l'ouverture des dimensions fort petites, et avoir le soutien construit de manière que l'on puisse imprimer à la lame de sel gemme un mouvement rotatoire autour de son axe vertical, et mesurer, au moyen d'une division circulaire convenablement disposée, l'angle que la normale à cette lame forme avec le faisceau de chaleur incidente. Quant à la source calorifique, il faudra la choisir fort intense, afin d'en tirer, par un éloignement convenable, des rayons énergiques et sensiblement parallèles, conditions qui sont assez bien remplies par la flamme d'huile ou la spirale incandescente placée au foyer d'un miroir métallique.

Tout étant disposé comme nous venons de le dire, on éloignera ou on rapprochera la source de la lame, jusqu'à ce que l'on ait produit, sous l'action de l'incidence perpendiculaire, une déviation fixe de 30 à 35 degrés.

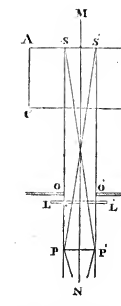
Alors on fera tourner lentement le soutien: les deux faces de la lame deviendront de plus en plus obliques sur le faisceau de chaleur; et cependant le thermoscope marquera toujours le même degré de son échelle, tant que l'obliquité ne dépassera pas le vingtième degré. Après quoi, l'index commencera à se rapprocher du zéro, et d'autant plus que la lame s'inclinera davantage sur les rayons incidents. Or, comme les radiations calorifiques ne perdent pas de leur intensité en franchissant une épaisseur quelconque de sel gemme pur et limpide, il est é-

vident que la diminution observée ne provient pas du plus grand espace que le faisceau oblique doit parcourir dans l'intérieur de la lame ; elle dérive donc de la surface, de manière que les rayons qui pénètrent la lame sous une certaine obliquité subissent, par l'effet de la réflexion, à la surface d'entrée et à la surface de sortie, une plus grande perte que les rayons perpendiculaires.

Ainsi, on ne saurait déduire des quantités de chaleur, transmises sous l'action de différentes sources, la ressemblance ou la dissemblance des radiations qui tombent successivement sur la même lame, sans être sûr qu'elles y éprouvent des réflexions égales.

Maintenant, puisque nos sources de chaleur ne possèdent pas le même volume, et que, loin d'être placées à des distances proportionnelles à leurs diamètres, les plus volumineuses se trouvent au contraire plus rapprochées, les filets divergents des sources voisines rencontreront nécessairement la lame diathermique sous des angles plus ouverts que les filets divergents des sources éloignées, et nous venons de voir que la réflexion augmente avec l'inclinaison des rayons : on dirait donc que notre méthode comparative est inexacte.

Mais si l'on veut bien revenir un instant sur la nullité d'action que présentait d'abord l'inclinaison de la lame de sel gemme, on en tirera aussitôt la conséquence que l'inexactitude de l'artifice employé, pour établir l'égalité des chaleurs rayonnées par les différentes sources, ne saurait avoir lieu que dans les cas où l'obliquité des filets calorifiques autour de la normale dépasse l'angle limite de 20 degrés.



Soit SS' la source rayonnante, OO' l'ouverture de l'écran, LL' la lame soumise à l'expérience, PP' le tube de la pile thermoscopique ; le tout rapporté à une section horizontale de l'appareil.

Les rayons actifs qui s'écartent le plus de la normale à la lame, seront évidemment ceux dirigés selon les lignes SP' et S'P qui joignent ensemble les bords opposés de la source et du tube. Pour savoir si les plus grandes déviations du parallélisme des filets élémentaires dont se compose le faisceau de chaleur qui agit sur la pile sont au-dessous de 20 degrés, il suffira donc de fixer en SS' le bord postérieur d'une planchette horizontale ABCD que l'on dressera perpendiculairement à l'axe MN de l'appareil thermo-électrique, et d'y marquer la place SS' occupée par la source calorifique. Après quoi on ôtera la source; on placera successivement l'œil en S et en S'; et l'on tirera, au moyen d'une alidade dirigée vers les points P', P, les lignes SP', S'P. C'est par la mesure de l'angle que chacune de ces lignes forme avec la perpendiculaire élevée sur les points de rencontre avec la ligne AB, que l'on jugera si les rayons les plus divergents ne sortent pas de la limite assignée.

Or, l'observation prouve que, tant qu'il s'agit des flammes, du platine incandescent, des métaux chauffés au-des-

sous de l'incandescence, et même du vase rempli d'eau bouillante, l'angle de plus grande déviation est inférieur à la *limite de tolérance*, puisqu'il varie entre 5 ou 6 degrés pour les premières sources, et entre 8 à 10 pour les dernières, dans tous les appareils thermo-électriques assez sensibles et disposés de manière à fournir la quantité de chaleur transmise, dégagée de l'effet dû à l'échauffement de la lame.

Mais quand on emploie le récipient chauffé d'un petit nombre de degrés au-dessus de la température ambiante, on ne peut obtenir la déviation initiale qu'en rapprochant la source, au point de rendre le *maximum* d'obliquité des rayons divergents supérieur à l'angle limite.

Alors la différence de réflexion entre les faisceaux calorifiques que l'on fait arriver successivement sur la même lame a lieu, et les transmissions ne sont plus comparables. Elles le sont d'autant moins, que les filets divergents traversent alors un plus grand espace dans l'intérieur de la lame et subissent de la part du milieu une action absorbante dont l'effet total dépend, comme celui de la réflexion, du rapprochement de la source. Si l'on opérait sur des lames épaisses de quelques millimètres, la lenteur de l'absorption qu'éprouverait le faisceau calorifique, vers la fin de son cours, serait telle que la petite différence de marche entre les rayons obliques et les rayons perpendiculaires ne produirait aucun effet sensible. Mais il n'en est pas de même pour les couches fort minces où la variation dans la proportion de chaleur absorbée devient très rapide; et nous savons que, dans les cas de basse température, le sel gemme, le soufre et le spath fluor exceptés, tous les autres milieux ne transmettent que sous

forme de lames minces, des quantités de chaleur assez considérables pour être susceptibles d'une mesure exacte.

Lorsqu'on ne cherche pas les valeurs précises de ces transmissions, et lorsqu'on veut seulement vérifier la ressemblance ou la dissemblance des rayonnements du vase porté à diverses températures par le contact intérieur de l'eau chaude, on peut éviter complétement la *double erreur* résultant de la variation d'obliquité des filets calorifiques, en opérant toujours à la même distance.

A cet effet il suffit de produire d'abord les 30 degrés de déviation initiale, moyennant l'action directe de la chaleur rayonnée par la source de plus basse température, et de *dériver* ensuite une certaine portion du courant thermo-électrique, excité par le rayonnement des sources plus intenses, selon la méthode indiquée au § 3 du premier chapitre.

Il est clair qu'en modifiant ainsi convenablement la sensibilité de l'appareil, le vase plus ou moins chaud pourra rester immobile à sa place et produire toujours le même effet sur le thermoscope.

Avec cet artifice on parviendra donc à annuler complétement les variations dues aux différences de distance et de volume des sources rayonnantes, et à établir des comparaisons exactes entre les quantités de chaleur successivement transmises par la même lame sous l'action du vase porté à différentes températures.

Mais l'expérience ne fournirait aucune lumière sur la qualité des rayonnements explorés, sans la certitude que l'effet observé provient des rayons calorifiques immédiatement transmis, et non pas de la chaleur absorbée par la lame et rayonnée ensuite sur le thermoscope. Autre-

ment on pourrait soutenir que tout est dû à cette seule espèce de chaleur, et que la constance de l'effet observé n'indique autre chose que l'égalité de l'échauffement de la lame sous les radiations calorifiques de même intensité qui viennent frapper successivement sa surface antérieure.

Avant de passer aux mesures, il est donc indispensable de s'assurer, en transportant la pile hors du faisceau calorifique et en la maintenant également distante de la lame et toujours tournée vers elle, que la chaleur propre de cette lame, soumise au rayonnement de la source, n'exerce aucune influence appréciable sur l'appareil thermoscopique.

Or, comme l'intensité du rayonnement d'un corps échauffé au-dessous de 100 degrés est très-faible, on ne pourra produire sur le galvanomètre les 30 degrés de déviation initiale qu'en rapprochant beaucoup la source de la pile, et, à plus forte raison, de l'ouverture de l'écran contre laquelle on place la lame diathermique, ce qui augmentera nécessairement l'action de son échauffement sur le thermoscope; car le calcul démontre que si l'on développe successivement le même effet thermoscopique, au moyen de sources rayonnantes plus ou moins intenses et plus ou moins éloignées, l'échauffement d'un corps, interposé entre la source et le thermoscope, agit sur l'instrument avec une intensité d'autant plus grande que la source est plus rapprochée.

Mais, d'autre part, on démontre aussi par le calcul, que l'action de cet échauffement du corps interposé est en raison inverse de la sensibilité du thermoscope; de manière qu'elle devient physiquement nulle jusque dans

les cas les plus défavorables, par rapport aux thermo-multiplicateurs fournis d'excellents systèmes astatiques (*). L'unique moyen de se tirer d'embarras consiste donc à se procurer un appareil thermoscopique d'une délicatesse extrême, qui permette d'opérer à une distance considérable de la plus faible source calorifique et de la lame intermédiaire, en rendant ainsi totalement insensible l'action due à l'échauffement de cette lame ; ce que l'on devra d'ailleurs vérifier expérimentalement dans chaque cas particulier, au moyen de l'artifice tant de fois indiqué : c'est-à-dire au moyen du retour de l'index rhéométrique à sa position naturelle d'équilibre, lorsque la pile est poussée hors de la direction du faisceau transmis de chaleur, tout en se maintenant tournée vers la lame diathermique.

Mais on ne doit pas renoncer pour cela au second artifice exposé tantôt, moyennant lequel on rend égales les incidences obliques des faisceaux de chaleur, plus ou moins intenses, rayonnés par la paroi du récipient porté à différentes températures.

On laissera donc en place le vase rempli d'eau plus ou moins chaude, et pour rendre l'effet du rayonnement toujours le même on interposera, entre les deux vases de mercure qui communiquent aux extrémités du galvanomètre, un fil mince de platine d'une longueur plus ou moins grande ; puis on passera aux mesures de transmission comparées. Alors on sera certain que les filets calorifiques respectifs des divers flux de chaleur subissent les

(*) *Voyez pour la démonstration de ces deux théorèmes la note du présent chapitre portant le n.° 12.*

mêmes réflexions et parcourent les mêmes espaces dans l'intérieur de chaque lame soumise à l'expérience.

La nécessité de ne pas changer la position de la source calorifique dans ces recherches résulte de la nature même des moyens d'analyse employés. Car la chaleur rayonnante des sources de basse température ne traverse, comme nous l'avons déjà remarqué, la plupart des substances thermochroïques en quantités assez considérables pour être susceptibles de mesure, que dans le cas où ces substances sont réduites en couches très-minces. Et comme la force absorbante du milieu opère avec beaucoup d'énergie près de la surface d'entrée, les filets divergents des faisceaux, explorés à diverses distances des sources, éprouveraient pendant leur court trajet dans l'intérieur de la lame une perte plus grande pour les sources de basse température, qui sont les plus rapprochées, et donneraient ainsi une moindre quantité de chaleur transmise jusque dans le cas où les rayons, qui s'écartent le plus de l'axe, forment avec lui un angle inférieur à 20 degrés; ce qui n'indiquerait pas, comme on le voit, une différence de qualité des rayons explorés, mais bien une différence entre les petites épaisseurs parcourues par les filets obliques des divers faisceaux calorifiques incidents.

Trompé par ces diverses causes d'erreur, je crus dans un premier essai, que le mica réduit en lames minces transmettait la chaleur des corps, chauffés au-dessous de 100 degrés, en proportions d'autant plus considérables que la température du corps rayonnant s'approchait davantage d'une telle limite.

Cependant, lorsque je répétai plus tard l'expérience avec toutes les précautions convenables, et sur le mica, et sur

les autres substances qui composent la série des lames inscrites dans les derniers tableaux, je n'obtins plus aucune différence appréciable entre les transmissions de ces diverses espèces de chaleur, et je dus en conclure qu'il n'y avait, jusqu'à présent, aucune raison d'admettre des différences de composition entre les flux de chaleur rayonnante vibrés par les corps dont les températures sont égales ou inférieures à 100 degrés.

Une conclusion analogue avait été émise, avant moi, par un jeune physicien allemand; mais, comme dans les expériences qui ont servi de base à cette conclusion, on n'avait pris aucune précaution pour obtenir la même divergence entre les filets élémentaires qui composent les rayonnements des diverses sources de chaleur, et que, d'autre part, la nature et l'épaisseur des lames employées, montrent que la plupart d'entre elles *arrêtaient complétement* le passage des radiations des sources inférieures à 100 degrés, il est évident que la constance de l'effet observé dans ces expériences se rapportait en très-grande partie, si ce n'est en totalité, à l'échauffement des lames, et ne pouvait conduire à aucune conséquence légitime sur la qualité des radiations explorées.

Les corps semblent donc produire les mêmes rayons calorifiques tant que leur température se maintient au-dessous de 100 degrés.

Des expériences analogues montrent qu'il en est encore ainsi pour les températures comprises entre 100 et 150 ou 160 degrés, comme il est facile de le vérifier en remplaçant l'eau par l'huile, que l'on maintient à la même température par le moyen, indiqué au second chapitre, d'une flamme d'alcool plus ou moins volumineuse, convenablement disposée au-dessous du vase.

Dans l'un et l'autre cas, il est indifférent que la paroi rayonnante soit formée par un métal quelconque décapé, verni, oxydé ou noirci; ou bien qu'elle soit en bois, en cuir ou en marbre; de manière que lorsqu'ils sont élevés à la même température, tous les corps donnent des flux calorifiqués qui traversent dans la même proportion chacune des lames perméables à la chaleur rayonnante des sources à basse température et paraissent ainsi indiquer, comme dans le cas d'un seul corps porté à une température quelconque inférieure à 160 degrés, la constance des espèces et de leurs proportions réciproques dans les flux rayonnants de ces diverses sources de chaleur.

Je n'affirme pas qu'il en soit rigoureusement ainsi:

1.° Parce que nous avons vu, au troisième paragraphe du présent chapitre, que l'égalité de transmission par les mêmes lames n'est pas un signe certain de l'égale composition de deux rayonnements;

2.° Parce que les substances thermochroïques très-minces, que l'on est forcé d'employer dans l'analyse de la chaleur rayonnée par les sources de basse température, ont perdu la plus grande partie de leurs thermochrôses, ainsi que le ferait à l'égard de la lumière une couche très-mince de liquide coloré; et que la diathermasie des grosses plaques de spath fluor et de soufre, pour toute sorte de chaleurs rayonnantes, prouve que la couleur thermique de ces deux milieux est très-faible, et peu capable de dévoiler les différences spécifiques existant entre les éléments qui composent les flux calorifiques soumis à l'expérience.

Il s'ensuit que, même au-dessous de 160 degrés, on trouverait peut-être quelques inégalités entre les rayon-

nements des différents corps élevés à la même température, ou entre les rayonnements du même corps porté à différentes températures, si ces divers flux de chaleur pouvaient être analysés par des moyens plus efficaces que ceux employés jusqu'à ce jour.

Quoiqu'il en soit, il ne faut pas oublier :

Que l'hétérogénéité de la thermochrôse, c'est-à-dire, l'existence de plusieurs éléments dans les flux calorifiques des corps chauffés au-dessous de 160 *degrés, est parfaitement démontrée par l'expérience;*

Que ces éléments diffèrent, par la qualité et la proportion, de ceux qui composent le rayonnement des sources à 400 degrés ;

Et que tous ces rayons élémentaires ne sauraient se confondre avec l'assemblage des espèces rayonnantes obscures vibrées par les flammes et par les métaux incandescents.

RÉSUMÉ

DES PRINCIPAUX FAITS ET ARGUMENTS QUI NOUS ONT CONDUIT A ADMETTRE L'IDENTITÉ DES RADIATIONS LUMINEUSES ET DES RADIATIONS CALORIFIQUES.

La lumière des flammes et des corps incandescents est accompagnée d'une grande quantité de chaleur rayonnante obscure.

Celle-ci se compose de plusieurs éléments analogues aux couleurs prismatiques, susceptibles comme elles de traverser le vide, parcourant comme elles des directions rectilignes dans un intervalle de temps inappréciable, et sans ressentir aucune influence de l'état de repos ou de mouvement dans lequel se trouvent les particules pondérables des milieux traversés.

Les radiations calorifiques obscures contiennent, elles aussi, plusieurs espèces élémentaires soumises aux mêmes lois de propagation que les radiations lumineuses. Cependant le nombre de ces espèces diminue avec la température de la source rayonnante.

Au-dessous de 160 degrés centigrades le rayonnement est encore complexe, mais par le changement de température ses éléments n'éprouvent plus aucune variation appréciable aux moyens actuels d'analyse; de sorte que les corps élevés à 50 degrés, par exemple, semblent produire un flux calorifique contenant les mêmes espèces élémentaires que le flux calorifique des corps chauffés à 100 degrés.

Les milieux *diathermiques*, c'est-à-dire les milieux *transparents* pour la chaleur rayonnante, sont doués de *for-*

ces électives variables selon la nature de la substance dont ils se composent, absorbant ou transmettant tantôt l'une, tantôt l'autre espèce de radiations calorifiques, et agissant ainsi comme les couleurs des milieux transparents par rapport aux rayons lumineux.

Cette ressemblance nous a d'abord engagé à désigner le phénomène par le nom générique de *thermochrôse*; de manière qu'une pareille dénomination prise dans un sens spécial signifie la *couleur thermique* propre au milieu que l'on observe ou dont on parle.

Comme les différences les plus remarquables entre les quantités de chaleur transmises se manifestent dans la classe des substances transparentes sans aucune trace de couleur visible, nous en avons déduit que les *teintes calorifiques* de ces substances n'ont aucune action sensible sur l'organe de la vue.

Des expériences de transmission successive nous ont ensuite convaincu que la thermochrôse des milieux les plus limpides est un fait indubitable, et non pas une simple analogie; et que, par conséquent, les *couleurs thermiques invisibles* sont tout aussi certaines que les couleurs ordinaires.

C'est à la qualité de la thermochrôse, plus ou moins *sombre*, et à son action particulière sur telles ou telles espèces de radiations obscures, que les milieux *thermochroïques* incolores doivent la propriété de transmettre des quantités inégales de chaleur rayonnante.

Des actions analogues produisent, soit la supériorité de la *diathermasie*, ou de la transmission calorifique, de certains corps rembrunis sur la diathermasie des milieux tout à fait limpides, soit le passage immédiat de la chaleur rayonnante à travers certaines substances complétement opaques.

Les flux calorifiques émergents des substances diathermiques ayant été altérés dans les quantités relatives des éléments qui composent la radiation directe, ne traversent plus les mêmes milieux dans les proportions primitives.

Cependant les radiations, directes ou transmises, des différentes sources de lumière et de chaleur donnent un rapport constant lorsqu'il s'agit du sel gemme, parce que cette substance est incolore et *athermochroïque*, et offre par conséquent un libre passage à tous les rayons de l'un et de l'autre agent.

Les couleurs, proprement dites, agissent sur le rayonnement calorifique aussi bien que sur la lumière; car les milieux colorés absorbent toujours une quantité plus ou moins grande de la chaleur incidente, et transmettent tantôt des radiations lumineuses privées de rayons obscurs, tantôt des radiations obscures privées de lumière, tantôt enfin un groupe de rayons lumineux et un groupe de rayons obscurs.

Si la réciprocité n'existe pas aussi nette dans les phénomènes de la thermochrôse, les forces de transmission et d'absorption des milieux thermochroïques sans transparence, ou sans couleur, exercent cependant, sur certaines radiations invisibles de chaleur, les mêmes actions que sur la lumière. Nous voyons, en effet, la diathermasie des corps opaques admettre un groupe déterminé de rayons calorifiques obscurs et *intercepter* le reste comme toute espèce de radiation lumineuse; et nous voyons, d'autre part, la thermochrôse des substances incolores absorber un groupe donné de rayons calorifiques obscurs, et *transmettre* les autres conjointement aux rayons lumineux.

Lorsqu'on opère sur un flux lumineux et calorifique

privé de ses éléments obscurs par l'absorption préalable de certains milieux, les substances diathermiques opaques perdent leur propriété de transmettre la chaleur rayonnante, et les substances diaphanes incolores deviennent toutes également perméables à la radiation calorifique incidente. Mais les milieux colorés continuent à transmettre des proportions différentes de ce flux lumineux et calorifique épuré, et la chaleur transmise semble n'avoir aucun rapport avec l'intensité de la lumière concomitante.

Ces phénomènes, si remarquables et si variés, s'expliquent tous jusque dans leurs moindres détails, si l'on suppose que les diverses espèces de chaleur obscure possèdent la même constitution physique que les diverses espèces de lumière, et forment avec elles une seule et même série.

Alors les rayons lumineux cessent d'appartenir à un agent spécial, et deviennent de véritables rayons visibles de chaleur. Le pouvoir échauffant de la lumière résulte de l'essence même du principe adopté, et les différences entre un élément calorifique invisible et un élément de lumière se réduisent à de simples propriétés spécifiques, semblables à celles qui servent de caractères distinctifs entre l'une et l'autre espèce de couleurs.

La visibilité et l'invisibilité ne peuvent fournir aucune objection sérieuse contre cette théorie ; car la lumière et les couleurs sont de pures conséquences de notre organisme, et n'ont aucune importance relativement au principe inconnu auquel nous devons le rayonnement des sources lumineuses ou obscures. Un certain nombre de rayons jouit de la propriété d'affecter l'œil, tandis que le reste de la série ne peut se mettre en rapport avec lui.

C'est ainsi que les ondes aériennes comprises entre cer-

taines limites de longueur excitent la sensation du son, et que les autres mouvements ondulatoires, dont les périodes sont plus longues ou plus courtes que celles des ondes sonores , passent inaperçus à l'organe de l'ouïe.

Ce parallèle est tellement exact qu'il se soutient jusque dans les anomalies. On trouve des personnes qui ne peuvent distinguer les couleurs, ni apercevoir les rayons extrêmes du spectre solaire, et d'autres qui confondent les sons et n'entendent pas les notes trop aiguës ou trop graves.

L'identité des deux agents une fois admise , l'action que les couleurs visibles exercent indistinctement sur telle ou telle qualité de lumière ou de chaleur rayonnante , devient une conséquence directe de l'unité du genre auquel appartiennent toutes ces espèces de radiations.

Et l'on conçoit nettement pourquoi la thermochrôse des substances les plus limpides est invisible , et comment certains corps opaques sont perméables à la chaleur rayonnante; car le rayonnement calorifique d'une source lumineuse, débarrassé de ses éléments obscurs, étant transmis en proportions égales par les milieux incolores et intercepté par les milieux opaques , il en résulte évidemment que tous les phénomènes thermochroïques qui paraissent en opposition avec la coloration et la transparence ordinaires , sont relatifs aux diverses espèces de rayons obscurs et ne peuvent se décéler à nos yeux par aucun signe apparent.

Bien des substances nous semblent aussi limpides que le sel gemme. Cependant l'eau, le verre, et autres milieux solides ou liquides exempts du moindre vestige de coloration , sont réellement *colorés* , puisqu'ils absorbent des proportions plus ou moins grandes de certaines radiations ob-

seures. Le sel gemme étant également perméable aux diverses qualités de chaleur, directe ou transmise, lumineuse ou obscure, constitue, dans l'état actuel de nos connaissances, le seul milieu solide véritablement *incolore*.

Cette nullité d'action absorbante, ce passage entièrement libre que les couleurs thermiques des substances dénuées de toute trace de coloration apparente livrent aux rayons lumineux, n'ont rien de contraire aux lois connues de la coloration ordinaire; car ces couleurs se comportent relativement à la série entière des rayons obscurs et lumineux, comme le font, par rapport à la lumière, certains milieux colorés, qui *transmettent complétement* les radiations prismatiques douées des mêmes couleurs. Et cette comparaison est d'autant plus juste, que la somme des espèces visibles de chaleur est fort inférieure à celle des espèces invisibles, jusque dans le rayonnement des sources les plus brillantes.

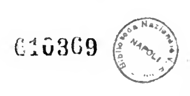
Quant au manque de proportionnalité entre les actions calorifique et lumineuse des rayons transmis par les substances diaphanes colorées, lorsque la radiation incidente est débarrassée de tout élément de chaleur obscure, il faut l'attribuer à la constitution même de l'organe de la vue, qui nous permet bien de reconnaître les différentes espèces dont se compose la série des éléments lumineux, mais qui nous rend tout à fait incapables d'évaluer leurs intensités relatives.

Les singularités que présente la transmission de la chaleur rayonnante à travers les milieux solides et liquides deviennent ainsi des conséquences toutes naturelles de l'imperfection de l'œil. Et les *deux transparences* et les *deux colorations* des corps, loin d'établir un caractère distin-

ctif entre la lumière et la chaleur rayonnante, constituent, pour nous servir d'une phrase déjà employée dans les pages précédentes, *le lien le plus puissant qui réunisse ensemble ces deux grands agents de la nature.*

Comme la réduction des causes au plus petit nombre possible de principes fondamentaux constitue le but final des sciences naturelles, cette manière de considérer les radiations calorifiques et lumineuses, doit être préférée aux hypothèses qui attribuent les phénomènes lumineux et les phénomènes calorifiques à deux agents divers ou à deux modifications essentiellement distinctes d'un même agent. Elle doit l'être d'autant plus que, si dans les théories de la dualité on conçoit aisément les dissemblances entre ces deux ordres de phénomènes, on ne parviendra jamais à expliquer nettement leurs ressemblances. En supposant le principe lumineux différent du principe calorifique, on ne saurait indiquer, par exemple, une cause précise à ce fait bien connu que la lumière tire ordinairement, comme la chaleur, son origine d'une élévation de température communiquée à la matière pondérable; ni démontrer pourquoi l'action calorifique est inséparable de l'action lumineuse; et l'on ne saurait concevoir enfin comment il se fait qu'il y ait identité parfaite entre les lois générales qui président à la propagation des deux agents, et aux modifications qu'ils subissent, soit à la surface, soit à l'intérieur des corps.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.



ERRATA (*)

Page	*Ligne*	*Au lieu de*	*Lisez*
XIV —	1	BIBLIOTÈQUE	BIBLIOTHÈQUE
XVII —	5	mis	remis
XXVI —	13	retreinte	restreinte
18	15 (Note)	rélativement	relativement
41	2 du § 4.	tubes	fils
45	7	rayonnement	rayonnements
61	6	$x=\frac{5}{15}a$	$x=\frac{5}{1,5}a$
62	29	pour les forces	les forces
68	14	rappeller	rappeler
149	22	thermomètre	galvanomètre
156	30	différentes	quelconque
168	22	trasmission	transmission
188	7	muni	munis
188	17	(1)	(14)
202	6	ehauffé	chauffé
223	26	rappellant	rappelant
232	18	incolores	colorés
236	19	TRASPARENCES	TRANSPARENCE
id.	24	eût	eut
238	17	n'etaient	n'étaient
id.	26	trasparence	transparence
239	11	régne	règne
240	21	pupilles	papilles
243	10	sons	tons
244	30 (Note)	frauchement	franchement
		dans, cette note,	dans cette note,
263	19	ajounterons ;	ajouterons
265	4	presentant	présentant
296	11	prés	près
327	18	plus , aucune	plus aucune

(*) *La plupart des erreurs indiquees dans cet errata n'existent que dans un petit nombre d'exemplaires.*

TABLE RAISONNÉE

DES

MATIÈRES TRAITÉES DANS CE VOLUME.

INTRODUCTION

Contenant un aperçu historique des circonstances qui ont amené la publication de l'ouvrage, ainsi qu'une idée générale du but auquel il tend et des moyens de mesure adoptés pour l'étude des rayonnements calorifiques.

TEXTE

CHAPITRE I.

DES INSTRUMENTS PROPRES A MESURER LA CHALEUR RAYONNANTE.

CHAPITRE II.

DES SOURCES CALORIFIQUES, ET DE L'ÉGALE ABSORPTION QUE LEURS RAYONS ÉPROUVENT PAR L'ACTION DU NOIR DE FUMÉE.

CHAPITRE III.

DU RAYONNEMENT CALORIFIQUE DANS LE VIDE ET DANS L'AIR ATMOSPHÉRIQUE.

CHAPITRE IV.

TRANSMISSION DE LA CHALEUR RAYONNANTE PAR LES MILIEUX SOLIDES ET LIQUIDES.

NOTES

CHAPITRE I.

1. Le principe qui sert de base à la théorie de Wells sur le refroidissement nocturne est vrai, mais les expériences que l'on a citées jusqu'à ce jour pour l'établir sont inexactes, et certaines inductions erronées. Nécessité d'armer les thermomètres avec des enveloppes métalliques, et de prendre en considération l'abaissement de température communiqué aux couches d'air environnantes par le rayonnement des végétaux ou du sol dénudé. La différence qu'indiquent, pendant les nuits calmes et pures, deux thermomètres, l'un desquels porte une armure métallique brillante et l'autre une enveloppe douée du *maximum* de pouvoir émissif, *est sensiblement constante sous toutes les températures atmosphériques*, quoique inférieure de beaucoup à la différence adoptée dans les traités de physique comme mesure de l'effet dû au rayonnement nocturne des corps. Conséquences importantes qui dérivent de ce fait et du séjour plus ou moins prolongé de l'air autour des surfaces rayonnantes : elles montrent comment il arrive qu'un thermomètre enveloppé de laine ou de coton se refroidit plus par le rayonnement nocturne qu'un autre thermomètre à face naturelle ou noircie, suspendu à ses côtés, et comment un thermomètre en contact avec une plante herbacée descend parfois de 10 à 12 degrés plus bas qu'un thermomètre élevé de 4 à 5 pieds au dessus du sol ; elles indiquent l'origine de la grande humidité qui règne de nuit dans les basses couches de l'atmosphère, ainsi que la cause de la précipitation abondante de vapeur acqueuse qui en résulte, et expli-

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

(Ce chapitre ne contient pas de notes explicatives.)

CHAPITRE IV.

APPENDICE

A LA NOTE 6, PAGE 66.

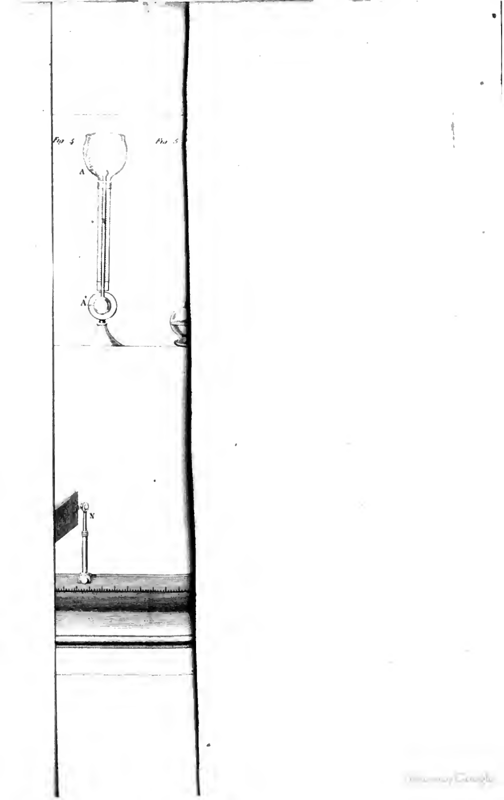
Dans cette note, allusive à la distinction importante à faire entre la rapidité des indications rhéométriques et la vitesse de propagation des agents dont elles dérivent, on décrit une expérience, dans laquelle M. Pouillet a produit 13 degrés de déviation en établissant, entre les extrémités du rhéomètre appartenant à un appareil thermo-électrique et les pôles d'un couple à la Daniell, un contact instantané d'un 2250me de minute seconde.

Afin qu'on ne tire pas de ce fait des conséquences erronées, nous ajouterons qu'une aussi petite fraction de temps ne suffirait plus dans le cas où le courant serait excessivement faible. Alors on ne pourrait obtenir un effet appréciable qu'en prolongeant davantage le contact, et *en sommant*, pour ainsi dire, la série des impulsions exercées *par la continuité* du courant électrique sur le système des aiguilles aimantées. Il ne faut pas oublier, d'autre part, que dans l'usage du thermomultiplicateur les communications entre la pile et le rhéomètre ne sont jamais interrompues, et que la force du courant augmente successivement jusqu'à ce qu'il y ait *équilibre mobile* entre la quantité de chaleur absorbée et la quantité de chaleur émise par le corps thermoscopique.

De toute manière on conçoit, qu'à parité de circonstances, *la rapidité des indications du thermomultiplicateur dépendra nécessairement de son degré de sensibilité*. Or, cette rapidité est évidemment utile dans les expériences thermoscopiques, et pour l'économie de temps, et pour éviter, dans certaines circonstances, la plus grande partie des perturbations exercées sur la mesure des radiations par l'échauffement des corps que l'on emploie à transmettre, à réfléchir ou à modifier, d'une manière quelconque, les rayons explorés.

A tous les avantages qui rendent les thermomultiplicateurs, doués d'une extrême sensibilité, si propices à l'étude de la chaleur rayonnante, il faut donc ajouter la promptitude de leurs indications.




Fig. 4
Fig. 5
A
A'
N

